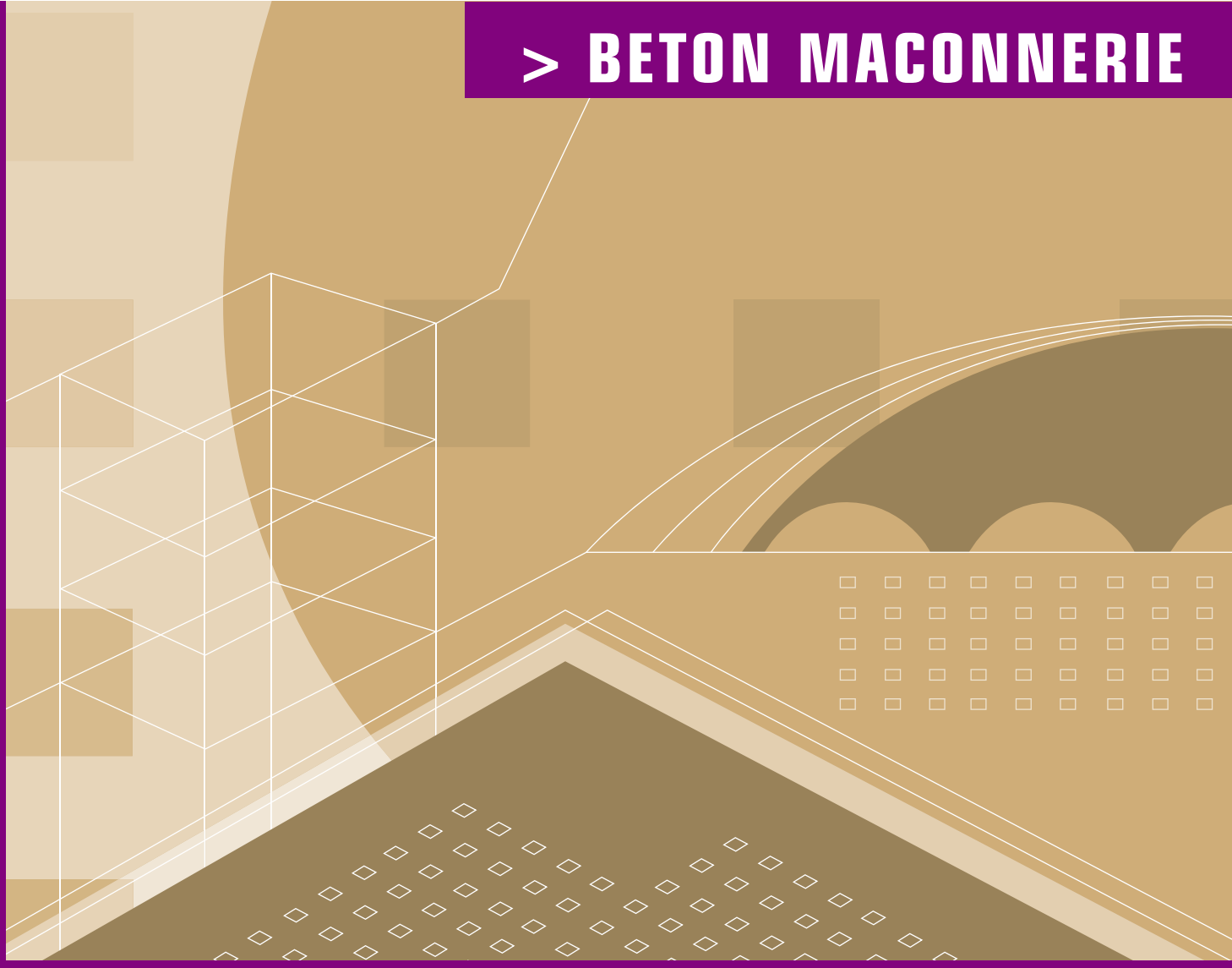
I FABEM 1 I GUIDES STRRES I

> BETON MACONNERIE



1 Reprise des bétons dégradés

STRRES
NOTRE TALENT DÉFIE LE TEMPS

UNE ÉDITION DU SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS
SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES (STRRES) / JUIN 2008

Le présent guide s'adresse **aux entrepreneurs** qui ont à réaliser la reprise de bétons dégradés et, si besoin est, le traitement des armatures corrodées. Il concerne aussi les deux autres acteurs de l'opération que sont **le prescripteur** et **le contrôleur** (maître d'œuvre ou son représentant).

Les réparations traitées dans le présent document peuvent avoir un caractère structural (avec ou sans renforcement) ou non structural et peuvent aussi concerner la préservation ou la restauration de la passivité des armatures.

L'introduction ci-après précise les opérations couvertes par le présent guide et également les autres guides, auxquels il convient de se référer pour réaliser certaines opérations connexes telles que, par exemple, l'injection des fissures, le scellement d'armatures additionnelles, l'application d'un revêtement de protection en fin de travaux…).

Figure n°1: Les trois intervenants, le maître d'œuvre (le prescripteur), l'entrepreneur et le contrôleur.

SOMMAIRE

INTRODUCTION **8**

MODE D'EMPLOI DU PRÉSENT GUIDE **14**

1 DÉFINITIONS – GÉNÉRALITÉS **15**

1.1 LA SITUATION DES DIFFÉRENTS DOCUMENTS TECHNIQUES ET ADMINISTRATIFS DISPONIBLES EN 2008 ..... **16**

1.2 LES DÉFINITIONS **17**

1.2.1 Les principales définitions de la norme homologuée NF P 95-101 ..... **18**

1.2.2 Les principales définitions de la norme homologuée NF EN 1504-1 ..... **19**

1.2.3 Les principales définitions de la norme harmonisée NF EN 1504-3 ..... **20**

1.2.4 Les principales définitions de la norme harmonisée NF EN 1504-7 ..... **21**

1.2.5 Les principales définitions de la norme harmonisée NF EN 1504-8 ..... **21**

1.2.6 Les principales définitions de la norme expérimentale XP ENV 1504-9 ..... **21**

2 DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE **23**

3 PRÉPARATION GÉNÉRALE DE L'OPÉRATION 27

3.1 GÉNÉRALITÉS 28
3.2 ÉTUDES PRÉLIMINAIRES – MÉTHODOLOGIE À SUIVRE 30

3.2.1 Généralités 30

3.2.2 Les manifestations des désordres 32

3.2.3 Les principales causes de dégradation des bétons 33
3.2.3.1 Généralités 33
3.2.3.2 Causes physiques de dégradation des bétons 34
3.2.3.3 Causes chimiques de dégradation des bétons 37
3.2.3.4 Causes mécaniques de dégradation des bétons 54
3.2.3.5 Facteurs aggravants : l'influence des défauts de conception et d'exécution et/ou des erreurs de gestion sur les dégradations du béton 55

3.2.4 Les types de pathologies et les objectifs spécifiques de la réparation 58
3.2.4.1 Généralités 58
3.2.4.2 Le matériau béton 58
3.2.4.3 Le matériau béton armé 59
3.2.4.4 Le matériau béton précontraint 63
3.2.4.5 Les défauts de fonctionnement des structures en béton armé et/ou précontraint 64

3.2.5 Le diagnostic et l'expertise préalable 64
3.2.5.1 Le diagnostic 64
3.2.5.2 La procédure à suivre 65
3.2.5.3 La visite préliminaire 66
3.2.5.4 L'inspection détaillée 67
3.2.5.5 Les investigations in situ 68
3.2.5.6 Les analyses et essais de laboratoire 71
3.2.5.7 Les vérifications en bureau d'études 72
3.2.5.8 Le rapport de diagnostic 74

3.2.6 Le projet de réparation 75
3.2.6.1 La consistance d'un projet de réparation 75
3.2.6.2 Les méthodes de réparation à mettre en œuvre en cas de désordres d'origine physique, chimique et mécanique 80
3.2.6.3 Les méthodes de réparation à mettre en œuvre pour préserver les armatures passives de la corrosion ou pour traiter les armatures corrodées 131

3.3 CHOIX DES PRODUITS, SYSTÈMES ET PROCÉDÉS DE RÉPARATION STRUCTURALE OU NON 155

3.3.1 Généralités 156

3.3.2 Critères de choix communs à tous les produits et systèmes de réparation 159
3.3.2.1 Critères de choix liés aux spécificités du travail à exécuter 159
3.3.2.2 Critères de choix liés à la santé, la sécurité, la protection de l'environnement, etc. 166

3.3.3 Critères de choix spécifiques aux produits et systèmes de réparation structurale et non structurale 168
3.3.3.1 Généralités 168
3.3.3.2 Choix des produits et systèmes de réparation des bétons appliqués en faibles épaisseurs 170

3.3.3.3 Choix des produits et systèmes de réparation ou de renforcement des bétons appliqués en fortes épaisseurs 179
3.3.3.4 Choix des produits et systèmes de collage structural des bétons 185
3.3.3.5 Choix des produits et systèmes d'injection de l'interface entre le produit de réparation et le béton support 188
3.3.3.6 Choix des produits et systèmes d'injection ou de remplissage des fissures ou des vides du béton 189
3.3.3.7 Choix des produits et systèmes de scellement d'armatures de béton armé 189
3.3.3.8 Choix des produits et systèmes de calage d'éléments 191
3.3.3.9 Choix des armatures passives additionnelles internes au béton 192
3.3.3.10 Choix des armatures passives extérieures au béton et collées 197
3.3.3.11 Choix des armatures et des systèmes de précontrainte pour l'ajout de forces 198
3.3.3.12 Choix des produits et systèmes d'ajout de forces par déformations imposées 200

3.3.4 Critères de choix spécifiques aux produits et systèmes de restauration ou de préservation de la passivité des armatures 200
3.3.4.1 Généralités 200
3.3.4.2 Choix des produits et systèmes de remplacement du béton carbonaté et/ou pollué ou d'augmentation du recouvrement des armatures pour apporter des alcalins et/ou augmenter la résistivité du béton 201
3.3.4.3 Choix des produits et systèmes nécessaires aux traitements électrochimiques 201
3.3.4.4 Choix des produits et systèmes de revêtement actif ou non des armatures de béton armé 204
3.3.4.5 Choix des produits et systèmes inhibiteurs de corrosion applicables sur les bétons 205
3.3.4.6 Choix des produits et systèmes pour la réinjection de conduits de précontrainte 206

3.3.5 Exigences concernant les constituants et les produits connexes 206
3.3.5.1 Généralités 206
3.3.5.2 Les granulats pour bétons et mortiers 207
3.3.5.3 Les liants hydrauliques 207
3.3.5.4 Les additions 208
3.3.5.5 Les fibres 208
3.3.5.6 Les adjuvants 209
3.3.5.7 L'eau de gâchage 209
3.3.5.8 Les résines synthétiques 209

3.3.6 Épreuve d'étude 210

3.4 CONDITIONNEMENT DES PRODUITS 211

3.4.1 Les différents produits 211

3.4.2 Conditionnement des produits prêts à l'emploi 211
3.4.2.1 Généralités 211
3.4.2.2 Marquage – Étiquetage 212

3.4.3 Conditionnement des produits fabriqués sur le chantier 216

3.5 TRANSPORT ET STOCKAGE DES PRODUITS 217

3.5.1 Généralités 217

3.5.2 Produits et systèmes de réparation et de passivation des armatures et produits divers (nettoyage…) 218

3.5.3 Autres produits de réparation (béton, armatures…) et produits connexes (granulats, adjuvants…) 218

3.6 MATÉRIELS À UTILISER **219**

3.6.1 Généralités **219**

3.6.2 Matériels de Préparation du support **219**

3.6.3 Matériels de Préparation des produits **219**

3.6.3.1 Généralités **220**

3.6.3.2 Matériels de préparation de produits prêts à l'emploi de type monocomposant à base de liants organiques **221**

3.6.3.3 Matériels de préparation de produits prêts à l'emploi multicomposants à base de liants organiques ou de liants hydrauliques et organiques **221**

3.6.3.4 Matériels de préparation des produits prêts à l'emploi ou non à base de liants hydrauliques **221**

3.6.4 matériels de mise en œuvre des produits **222**

3.6.4.1 Généralités **222**

3.6.4.2 Matériels de mise en œuvre de produits et systèmes de réparation des bétons appliqués en faibles épaisseurs **223**

3.6.4.3 Matériels de mise en œuvre de produits et systèmes de réparation des bétons appliqués en fortes épaisseurs **228**

3.6.4.4 Matériels de mise en œuvre de produits et systèmes de collage structural des bétons **233**

3.6.4.5 Matériels pour l'injection de produits et systèmes dans l'interface entre le produit de réparation et le béton support **234**

3.6.4.6 Matériels pour l'injection ou le remplissage de produits et systèmes dans des fissures ou des vides du béton **235**

3.6.4.7 Matériels de mise en œuvre de produits et systèmes de scellement des armatures de béton armé **235**

3.6.4.8 Matériels de mise en œuvre de produits et systèmes de calage d'éléments **237**

3.6.4.9 Matériels de mise en œuvre d'armatures passives additionnelles internes au béton **238**

3.6.4.10 Matériels de mise en œuvre par collage d'armatures passives extérieures au béton **238**

3.6.4.11 Matériels d'ajout de forces par précontrainte additionnelle **239**

3.6.4.12 Matériels d'ajout de forces par déformations imposées **239**

3.6.4.13 Matériels de remplacement du béton carbonaté et/ou pollué ou d'augmentation du recouvrement des armatures pour apporter des alcalins et/ou augmenter la résistivité du béton **239**

3.6.4.14 Matériels de mise en œuvre des traitements électrochimiques **239**

3.6.4.15 Matériels de mise en œuvre d'un revêtement actif ou non sur des armatures de béton armé **241**

3.6.4.16 Matériels de mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion sur bétons **242**

3.6.4.17 Matériels de réinjection de conduits de précontrainte **242**

4 MODES OPÉRATOIRES **243**

4.1 GÉNÉRALITÉS **244**

4.2 PRÉPARATION DU SUPPORT ET DES ARMATURES **246**

4.2.1 Généralités **246**

4.2.1.1 Le relevé des défauts du support en béton et des armatures **246**

4.2.1.2 Préparation du support béton et des armatures et qualité du support à obtenir **246**

Sommaire

4.3 PRÉPARATION ET RÉALISATION DE L'OPÉRATION 267

4.3.1 Généralités 267

4.3.2 Préparation des produits 268

4.3.2.1 Généralités 268

4.3.2.2 Préparation des produits prêts à l'emploi 269

4.3.2.3 Préparation des produits fabriqués sur le chantier 270

4.3.2.4 Préparation des autres produits (béton, armatures…) et des constituants (granulats, adjuvants…) 270

4.3.3 Réalisation de l'opération 270

4.3.3.1 Généralités 270

4.3.3.2 Réalisation d'une opération de restauration du béton 273

4.3.3.3 Réalisation d'une opération de renforcement structural 282

4.3.3.4 Réalisation d'une opération de restauration ou de préservation de la passivité des armatures 289

5 ESSAIS ET CONTRÔLES 299

5.1 GÉNÉRALITÉS 300

5.2 CONTRÔLES DE RÉCEPTION DES PRODUITS 301

5.2.1 Généralités 301

5.2.2 Réception des produits prêts à l'emploi 301

5.2.2.1 Réception des produits de réparation normalisés 301

5.2.2.2 Réception des autres produits de réparation 306

5.2.3 Réception des produits livrés sur le chantier 307

5.2.4 Réception des produits fabriqués sur le chantier 307

5.3 ÉPREUVES DE CONVENANCE 308

5.3.1 Généralités 308

5.3.2 Épreuves de convenance de préparation du support 309

5.3.3 Épreuves de convenance de mise en œuvre des produits 310

5.4 CONTRÔLES D'EXÉCUTION 313

5.4.1 Généralités 313

5.4.2 Contrôles d'exécution sur la préparation du support 314

5.4.2.1 Généralités 314

5.4.2.2 Contrôle d'exécution relatif à la préparation de l'opération de préparation du support 314

5.4.2.3 Principes généraux relatifs aux contrôles de réception du support et des armatures 316

5.4.2.4 Contrôles d'exécution sur la préparation du support pour une restauration du béton et /ou un renforcement structural 318

5.4.2.5 Contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas de la restauration ou de la conservation de la passivité des armatures 324

5.4.3 Contrôles d'exécution des travaux 330

5.4.3.1 Généralités 330

5.4.3.2 Contrôles d'exécution lors de la préparation de l'opération **330**
5.4.3.3 Contrôles d'exécution lors de la préparation des produits **332**
5.4.3.4 Contrôles d'exécution dans le cas de la restauration du béton et /ou du renforcement structural **335**
5.4.3.5 Contrôles d'exécution dans le cas de la restauration ou de la conservation de la passivité des armatures **346**
5.5 RÉCEPTION DES TRAVAUX **349**

6 HYGIÈNE ET SÉCURITÉ **351**

6.1 RAPPEL DES OBLIGATIONS **352**
6.2 CAS D'UN CHANTIER DE RÉPARATION DE BÉTON DÉGRADÉ **353**

7 GESTION DES DÉCHETS DU CHANTIER **355**

7.1 RAPPEL DES OBLIGATIONS **356**
7.2 CAS D'UN CHANTIER DE RÉPARATION DE BÉTON DÉGRADÉ **358**

8 FICHE SYNTHÉTIQUE DU PAQ **359**

APPENDICE **363**
INDEX **366**
TABLE DES ILLUSTRATIONS **377**

ANNEXE N°1 : DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE **387**

ANNEXE N° 2 : HISTORIQUE DU BÉTON ARMÉ **419**

ANNEXE N°3 : LES ACIERS INOXYDABLES **443**

ANNEXE N°4 : L'HYDRODÉMOLITION **457**

Avertissement

Le présent document a été rédigé dans l'optique d'une opération de mise en œuvre d'une opération de reprise des bétons dégradés lourde et complexe. Pour des chantiers de moindre importance, il peut être adapté, mais sans oublier les conséquences qui résulteraient d'une mauvaise exécution. Il est indispensable que soient respectées les exigences des normes et autres documents visés en référence et en annexe n°1 au présent guide (sous réserve qu'ils soient applicables à l'opération) ainsi que la démarche qualité développée dans le présent texte.

INTRODUCTION

Le présent guide relatif à la reprise des bétons dégradés des structures en béton armé et en béton précontraint traite de la mise en œuvre **de la majeure partie des méthodes de réparation ou de renforcement** permettant d'assurer **les trois fonctions[1] principales** suivantes :

- **Fonction principale I (principe 3.** de la norme **NF EN 1504-10) : la restauration du béton** en redonnant à la structure **sa forme** (géométrie) **et sa fonction** avec, éventuellement, **le remplacement** d'éléments concernés par des désordres, qui ne fait cependant pas l'objet de développements particuliers dans le présent guide.

- **Fonction principale II (principe 4.** de la norme **NF EN 1504-10) : le renforcement structural** pour restaurer **la portance de la structure**, cette dernière présentant des désordres, ou pour augmenter **la portance de la structure**, cette dernière, pouvant ou non, présenter des désordres;

- **Fonction principale III (principe 7.** de la norme **NF EN 1504-10) : la restauration ou la préservation de la passivation. La restauration** concerne les armatures touchées par la corrosion et **la préservation** des armatures non encore affectées par la corrosion.

■ **Certaines fonctions** de la norme **NF EN 1504-10 peuvent être considérées comme complémentaires des trois fonctions principales I, II et III. Il s'agit :**

- de la protection contre la pénétration des agents agressifs (principe 1. de la norme),
- de la maîtrise de l'humidité (principe 2. de la norme),
- de la résistance physique vis-à-vis de contraintes physiques et mécaniques provoquant l'usure et l'érosion de la surface du béton (principe 5. de la norme),
- de la résistance de la surface du béton aux produits chimiques (principe 6. de la norme);

■ **Certaines autres fonctions** de la norme **NF EN 1504-10 peuvent être considérées comme complémentaires de la fonction principale III. Il s'agit :**

- de l'augmentation de la résistivité du béton (principe 8. de la norme),
- du contrôle cathodique (principe 9. de la norme),
- de la protection cathodique (principe 10. de la norme),
- du contrôle des zones anodiques et cathodiques (principe 11. de la norme).

Le Tableau n° 1 qui suit synthétise les fonctions principales et complémentaires et les méthodes de réparation ou de renforcement associées.

Les méthodes de traitement du béton dégradé et des armatures, qui sont visées ou développées dans le présent GUIDE N°1 [FABEM], font l'objet de certains documents existants auxquels il faut se référer. Il s'agit :

■ d'une part, des deux normes européennes suivantes :

- la norme expérimentale **XP ENV 1504-9** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 9 : Principes généraux d'utilisation des produits et systèmes (tableaux 1 et 2)

[1] *Les normes de la série NF EN 1504-** utilisent, à la place du terme fonction, celui de* **«principe»**.

- la norme européenne **NF EN 1504-10** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 10 : application sur site des produits et systèmes et contrôle de la qualité des travaux (article 6 et tableau 1)[2];

- d'autre part, des normes françaises **NF P 95-101** : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et maçonnerie – Reprise du béton dégradé superficiellement, **NF P 95-102** : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et maçonnerie – Béton projeté, **NF P 95-103** : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et maçonnerie – Traitement des fissures et protection du béton et **NF P 95-104** : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et maçonnerie – Spécifications relatives à la technique de précontrainte additionnelle.

Les deux normes européennes traitent des nombreuses méthodes de réparation et renforcements destinées à satisfaire **des principes** ou **des fonctions**. Cependant, **certaines méthodes sont exclues** de la norme **NF EN 1504-10** (par exemple, l'extraction électrochimique des chlorures, la précontrainte additionnelle…) et d'autres ne sont traitées **qu'à titre informatif** (par exemple, l'application d'inhibiteurs de corrosion, la ré-alcalinisation électrochimique…). L'utilisation de ces deux normes est assez ardue à cause de l'enchevêtrement des méthodes de réparation ou renforcement mais aussi à cause des renvois à d'autres normes. Si les renvois aux normes d'essai ne posent pas trop de difficultés, il n'en est pas de même pour les renvois aux normes de produits et d'exécution car il n'y a aucun moyen de savoir si ces renvois concernent la totalité ou une partie seulement des normes visées. Il est donc nécessaire d'analyser ces normes et leur domaine d'application avant de pouvoir y faire référence **dans le marché**.

Les normes françaises couvrent également une bonne partie des méthodes développées dans le présent guide et la norme européenne.

Il a été décidé, pour rédiger le présent guide, de se baser sur le tableau 1 de la norme **NF EN 1504-10**. Celui-ci liste **30 méthodes de réparation et/ou de renforcement dont 4** ne sont traitées que dans **la partie informative. De plus, il exclut 8 autres méthodes.**

Sur les **38 méthodes citées, le GUIDE N°1 [FABEM]** en ajoute **3 non visées** par la norme européenne (réalisation de calages, ajout de forces par déformations imposées) et **en exclut 5** (la transformation de fissures en joints [déjà traité dans **le GUIDE N°2 [FABEM]**, le remplacement de certains éléments…). **Il en reste donc 36** dont **certaines font doublon** car elles satisfont **à plusieurs fonctions à la fois** (un revêtement de surface peut protéger contre le passage d'agents agressifs mais aussi assurer la résistance à l'abrasion ou à un produit chimique…).

Il est donc possible de séparer en **deux groupes les 36 méthodes** de réparation et/ou de renforcement des bétons ou de préservation et/ou de restauration de la passivité des armatures. Ces méthodes sont listées dans **le tableau, qui suit, inspiré du tableau 1** de la norme **européenne** :

- les méthodes du **groupe 1** font déjà l'objet de **normes spécifiques ou d'un guide du STRRES**. La cinquième colonne du tableau liste les documents de références associés;

- les autres méthodes font partie du **groupe 2**. Elles concernent, **sauf les méthodes 11.1 et 11.2** qui sont relatives à l'application de revêtements sur les armatures, **la mise en œuvre de mortier ou de béton** dans le cadre d'une restauration, d'un renforcement avec restauration ou préservation de la passivité.

[2] ATTENTION, les numéros des méthodes visées par les deux normes ne sont pas tout à fait identiques. Par exemple, le remplissage des fissures est noté 1.4 dans la 1504-9 et 1.5 dans la 1504-10. Le présent guide utilise la numérotation de la 1504-10

Classement	Fonction ou principe	Groupe 1 ou groupe 2	Méthode satisfaisant à la fonction ou principe	Norme, guide du STRRES ou document concernés	Observations
Ces fonctions sont complémentaires des fonctions 3, 4 et 7	1. protection contre la pénétration d'agents agressifs	1	1.1 : Imprégnation hydrophobe	n°4 (FABEM)	
		1	1.2 : Imprégnation	n°4 (FABEM)	
		1	1.3 : Revêtement de surface avec ou sans capacité de pontage des fissures	n°4 (FABEM)	
		1	1.4 : Fissures colmatées localement	n°2 (FABEM)	Partie informative de la 1504-10
		1	1.5 : Remplissage des fissures	n°2 et 3 (FABEM)	
		Sans objet	1.6 : transformations de fissures en joints.	Exclue du n°1 (FABEM) Voir le n°2 (FABEM)	Exclue de la 1504-10
		Sans objet	1.7 : montage de panneaux extérieurs (bardages…)	Exclue du n°1 (FABEM)	Exclue de la 1504-10
		1	1.8 : Application de membranes.	n°4 (FABEM)	
	2. maîtrise de l'humidité	1	2.1 : Imprégnation hydrophobe	n°4 (FABEM)	
		1	2.2 : Revêtement de surface	n°4 (FABEM)	
		Sans objet	2.3 : Protection ou sur-revêtement (étanchéités non adhérentes sous forme de feuilles de PVC, Hypalon…)	Exclue du n°1 (FABEM) Voir le n°4 (FABEM)	Exclue de la 1504-10
		Sans objet	2.4 : traitement électrochimiques (contre les remontées d'eau…)	Exclue du n°1 (FABEM)	Exclue de la 1504-10
Fonction principale I	3. restauration du béton	2	3.1 : Application de mortier à la main		
		2	3.2 : Nouveau coulage de béton	DTU 21 et Fasc 65 A	
		1	3.3 : Projection de béton ou de mortier	n°5 (FABEM)	
		Sans objet	3.4 : remplacement de certains éléments	Ne fait pas l'objet de développements dans le n°1 (FABEM) [3]	Exclue de la 1504-10
		2	? : Calages d'éléments		Non visée par le 1504-10
Fonction principale II	4. renforcement structural	1	4.1 : Ajout ou remplacement d'armatures en acier encastrées ou externes	DTU 21 et Fasc 65 A	
		1	4.2 : Installation de barres liées entre elles dans des trous préformés ou forés dans le béton	n°7 (FABEM)	
		1	4.3 : Collage de plaques	n°7 (FABEM)	
		2	4.4 : Ajout de mortier ou de béton	Idem fonction 3	
		1	4.5 : Injection dans les fissures, vides ou interstices	n°3 (FABEM)	
		1	4.6 : Remplissage de fissures, vides ou interstices	n°3 (FABEM)	
		1	4.7 : Armatures de précontrainte additionnelle	n°8 (FABEM)	Exclue de la 1504-10
		1	? : Ajout de forces par déformations imposées (vérinage)	n°8 (FABEM)	Non visée par le 1504-10
Ces fonctions sont complémentaires des fonctions 3, 4 et 7	5. résistance physique	2 et 1	5.1 : Recouvrement (mortier ou béton) ou revêtement de surface	Doublon des fonctions 3 ou 4 n°4 (FABEM)	
		1	5.2 : Imprégnation	n°4 (FABEM)	
	6. résistance aux produits chimiques	2 et 1	6.1 : Recouvrement (mortier ou béton) ou revêtement de surface	Doublon des fonctions 3 ou 4 n°4 (FABEM)	

*3 **Après la démolition partielle d'une structure,** les méthodes 3.3, 3.4, 4.1 et 4.2 permettent de reconstituer les éléments concernés et donc de le remplacer. L'élément, remplacé peut même avoir été préfabriqué en usine ou in situ mais il faut le lier à la structure, ce qui relève des quatre méthodes citées. Il n'est donc pas nécessaire de développer l**a méthode de remplacement d'éléments** dans le présent guide.*

Classement	Fonction ou principe	Groupe 1 ou groupe 2	Méthode satisfaisant à la fonction ou principe	Norme, guide du STRRES ou document concernés	Observations
Fonction principale III	**7. préservation ou restauration de la passivité :**	**2 et 1**	7.1 : Augmentation du recouvrement avec du mortier ou du béton supplémentaire ou un revêtement de surface	Doublon des fonctions 3 ou 4 et n°4 [FABEM]	
		2	7.2 : Remplacement béton contaminé ou carbonaté	Doublon des fonctions 3 ou 4	
		1	7.3 : Ré-alcalinisation électrochimique du béton carbonaté	FD CEN/TS 14308-1	**Partie informative de la 1504-10**
		2	7.4 : Ré-alcalinisation du béton carbonaté par diffusion	Doublon des fonctions 3 ou 4	Recouvrement en mortier ou béton
		1	7.5 : Extraction électrochimique des chlorures	Pas de norme	**Exclue de la 1504-10**
		1	**? : Réinjection des conduits**	n°8 [FABEM]	**Non visée par le 1504-10**
Ces fonctions sont complémentaires de la fonction 7	**8. augmenter la résistivité :**	**1**	8.1 : Imprégnation hydrophobe	n°4 [FABEM]	
		1 et 2	8.2 : limitation de la teneur en eau par des revêtements de surface ou des recouvrements (mortier ou béton)	n°4 [FABEM] et doublon des fonctions 3 et 4	
	9. contrôle cathodique :	**1**	9.1 : Limitation de la teneur en oxygène (à la cathode) par saturation ou revêtement de surface	n°4 [FABEM]	Saturation uniquement en cas d'immersion totale
	10. protection cathodique	**1**	10.1 Application d'un potentiel électrique	NF EN 12696	**Partie informative de la 1504-10**
	11. contrôle des zones anodiques et cathodiques	**2**	11.1 : revêtements sur les armatures : * fournissant un environnement alcalin * jouant le rôle d'inhibiteurs de l'action électrochimique * permettant une réaction galvanique sacrificielle		
		2	11.2 : revêtements de protection sur les armatures (revêtements étanches)		
		1 et 2	11.3 : Application d'inhibiteurs sur ou dans le béton	n°1 et 4 [FABEM]	**Partie informative de la 1504-10**

Tableau n° 1 : Liste et classification des différentes méthodes de réparation ou de renforcement traitées en tout ou partie dans le guide n°1

Tableau établi à partir du tableau n°1 de la norme européenne EN 1504-10

Pour simplifier l'utilisation des documents existants, le présent guide retient 16 méthodes regroupées en deux ensembles A et B. **En effet :**

- certaines des méthodes satisfont à plusieurs fonctions à la fois. Par exemple, un recouvrement en mortier ou béton peut assurer la restauration du béton comme la résistance à des agressions physiques ou chimiques….
- la plupart des méthodes satisfaisant à la fonction principale II de renforcement structural satisfont aussi à la fonction principale II de restauration du béton. Ces deux types de méthodes ont été rassemblées dans l'ensemble A.
- les méthodes qui satisfont à la fonction principale III de préservation ou de restauration de la passivité des armatures ont été rassemblées dans l'ensemble B.

ENSEMBLE A : méthodes dont la fonction relève de la restauration du béton et/ou du renforcement structural :

1. Mise en œuvre de produits ou systèmes de réparation des bétons appliqués en faibles épaisseurs (un recouvrement peut aussi servir à améliorer la résistance physique et/ou chimique du béton);
2. Mise en œuvre de produits ou systèmes de réparation ou de renforcement des bétons appliqués en fortes épaisseurs (un recouvrement peut aussi servir à améliorer la résistance physique et/ou chimique du béton);
3. Mise en œuvre de produits ou systèmes de collage structural des bétons (béton durci sur béton durci et béton frais sur béton durci);
4. Mise en œuvre par injection de produits ou systèmes dans l'interface entre le produit de réparation ou de renforcement et le béton support;
5. Mise en œuvre par injection ou remplissage de produits ou systèmes dans des fissures ou des vides du béton;
6. Mise en œuvre de produits ou systèmes de scellement des armatures de béton armé;
7. Mise en œuvre de produits et systèmes pour le calage d'éléments;
8. Mise en œuvre d'armatures passives additionnelles internes au béton;
9. Mise en œuvre par collage d'armatures passives extérieures au béton;
10. Ajout de forces par précontrainte additionnelle;
11. Ajout de forces par déformations imposées;

ENSEMBLE B : méthodes dont la fonction relève de préservation ou de la restauration de la passivité des armatures :

12. Mise en œuvre de produits ou systèmes dans le cadre des quatre méthodes suivantes qui sont déjà couvertes par les méthodes 1 et 2 visées ci-dessus :
    - Augmenter le recouvrement des armatures[4],
    - Remplacer un béton carbonaté et/ou pollué,
    - Ré-alcaliniser, par diffusion, le béton carbonaté,
    - Augmenter la résistivité du béton;

13. Mise en œuvre de traitements électrochimiques :
    - de ré-alcalinisation,
    - de déminéralisation,
    - de protection cathodique;

14. Mise en œuvre de revêtements actifs ou non sur des armatures de béton armé;

15. Mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion sur des bétons;

16. Mise en œuvre d'une réinjection de conduits de précontrainte.

Nota : *bien que* ***la méthode 12 de l'ensemble B*** *soit couverte par les méthodes 1 et 2 de* ***l'ensemble A,*** *elle a été conservée car elle assure ici des fonctions concernant l****a passivité des armatures.*** *Bien entendu, les articles du* ***GUIDE N°1 [FABEM]*** *qui traitent de cette méthode renvoient aux articles traitant des méthodes 1 et 2.*

Ces 16 méthodes peuvent être utilisées seules ou combinées entre elles pour restaurer ou renforcer une structure. **Elles sont traitées avec plus ou moins de développements par le présent GUIDE N°1 [FABEM] lequel renvoie, si nécessaire, aux autres guides du STRRES.**

Par exemple : les méthodes des ensembles A et B nécessitent parfois la mise en œuvre de certaines des méthodes complémentaires **du groupe 1 :**

- une protection contre la pénétration d'agents agressifs par la mise en œuvre :
  - d'une imprégnation hydrophobe,
  - d'une imprégnation,
  - d'un revêtement de surface;
- le colmatage local des fissures;
- le remplissage des fissures;
- l'application de membranes;
- une protection ou un sur-revêtement.

Les différentes méthodes listées ci-dessus relèvent des guides du STRRES suivants, auxquels le lecteur est invité à se reporter :

GUIDE N°2 [FABEM] : Traitement des fissures par : Calfeutrement – Pontage et protection localisée – Création d'un joint de dilatation;

GUIDE N°3 [FABEM] : Traitement des fissures par injection;

GUIDE N°4 [FABEM] : Protection des bétons.

[4] *L'augmentation du recouvrement des armatures améliore la protection contre la pénétration des agents agressifs tout en ré-alcalinisant le béton support et en augmentant la résistivité du béton.*

MODE D'EMPLOI DU PRÉSENT GUIDE

1. **Premier cas :** la méthode à mettre en œuvre a été fixée à la suite d'une étude (recherche des causes des désordres et mise au point d'un projet de réparation ou renforcement). Il reste à choisir les produits et le matériel de mise en œuvre, à appliquer les produits et à contrôler l'ensemble de l'opération :

    a. Si la méthode est détaillée dans le présent guide, il faut suivre ses indications à toutes les étapes de l'opération, sachant que, si nécessaire, il renvoie aux autres guides du STRRES. Il suffit donc de se reporter directement à l'article 3.3 ci-après qui traite du choix des matériaux et aux articles qui le suivent;

    b. Si la méthode est traitée en totalité par un des autres guides du STRRES, il suffit de s'y reporter (voir le Tableau n° 1 ci-devant);

2. **Deuxième cas :** la structure présente des désordres dont les causes restent floues et, bien entendu, la technique à mettre en œuvre n'est pas fixée. Dans un tel cas, il faut se reporter à l'article 3.2 qui décrit :
    - les différents désordres et leurs causes,
    - la réalisation d'une expertise pour aboutir à un diagnostic et un pronostic,
    - la consistance d'un projet de réparation ou de renforcement,
    - les différentes techniques de réparation ou de renforcement à mettre en œuvre en fonction des désordres constatés et de leurs causes.

1

Définitions - Généralités

1.1 La situation des différents documents techniques et administratifs disponibles en 2008

1.2 Les définitions

1.1 La situation des différents documents techniques et administratifs disponibles en 2008

> LA NORMALISATION FRANÇAISE

Les fonctions auxquelles doivent satisfaire **les produits et systèmes de réparation des bétons** ont été identifiées dans **les normes relatives aux produits spéciaux destinés aux réparations** élaborées dans les années 80-90 (normes de la série **P 18-8**** dont certaines sont le support de la **Marque NF-Produits spéciaux construction béton**, qui est régie par le règlement NF 030). Les textes français étaient pionniers en Europe mais non forcément adaptés aux pratiques des autres pays. **Cette classification française** a donc dû être, en partie seulement, remise en cause par la parution de **normes européennes.**

> LA NORMALISATION EUROPÉENNE

Depuis le début des années 2000, le rythme de parution des normes européennes s'est accru et leur substitution aux normes nationales se termine.

Ces normes européennes font appel à de **nouvelles classifications des produits et systèmes.** Cette exigence de **nouvelles fonctions** a été rendue possible par les progrès importants réalisés ces trente dernières années dans la connaissance des causes et des mécanismes conduisant à la dégradation des structures en béton armé ou non (dégradation du matériau béton et corrosion des armatures).

Pour pouvoir passer des classifications nationales aux classifications européennes et surtout pour pouvoir utiliser ces nouvelles normes européennes, des textes passerelles ont été élaborés. Ces textes ont été rendus également nécessaires pour les deux raisons supplémentaires suivantes :

- toutes les normes européennes ne sont pas encore parues et tous les textes de référence français n'ont pas encore été mis à jour;
- les normes européennes introduisent pour certaines fonctions des **exigences de performances comportant plusieurs niveaux** mais, malheureusement, sans donner les critères de choix des niveaux. Ces niveaux seront explicités dans le présent guide.

Nota : ***le premier encadré de la partie 2 ci-après,*** *relative aux documents de référence, précise ceux qui sont actuellement applicables et ceux qui le seront très prochainement. Pour plus de détail, il faut se reporter à* ***l'annexe n°1*** *qui traite de tous les documents de référence cités dans le présent guide. Elle liste les normes françaises qui vont être supprimées et celles qui seront conservées ou amendées.*

> Les principales définitions normalisées des termes utilisés dans le présent guide se trouvent regroupées dans les normes suivantes :

- la norme homologuée **NF P 95-101** : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Reprise du béton dégradé superficiellement;
- la norme homologuée **NF EN 1504-1** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 1 : Définitions;
- la norme harmonisée **NF EN 1504-3**[5] : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 3 : Réparations structurales et réparations non structurales;
- la norme harmonisée **NF EN 1504-7**[6] : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 7 : Protection contre la corrosion des armatures;
- la norme homologuée **NF EN 1504-8**[7] : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton – Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 8 : Maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité;
- la norme expérimentale **XP ENV 1504-9** : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton - Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité – Partie 9 : Principes généraux d'utilisation des produits et systèmes.

Figure n° 2 : les normes des séries NF P 95-1** et NF EN 1504-

[5] Les normes de cette série apparaissent comme «normes françaises homologuées». Il faut lire le paragraphe «analyse» qui indique celles qui ont été élaborées sous le mandat européen M/128 et qui débouchent sur le marquage CE et ont le droit au titre de normes harmonisées.
[6] Cette norme date de mars 2005.
[7] Des définitions complémentaires se trouvent également dans la norme homologuée NF EN 1504-10.

1.2.1 LES PRINCIPALES DÉFINITIONS DE LA NORME HOMOLOGUÉE NF P 95-101[8]

1. Termes généraux

- **dégradation superficielle :** affaiblissement de la qualité de protection des bétons d'une structure, en surface et sur une profondeur de quelques centimètres, ne mettant pas en cause la tenue d'ensemble de cette structure ;
- **dégradation structurale :** abaissement des caractéristiques des composants d'une structure mettant en cause la tenue d'ensemble de cette structure.

2. Produits et matériaux

- **types de produits utilisés :** les produits utilisés se classent en trois familles :
  - les produits à base de liants hydrauliques,
  - les produits à base de liants hydrauliques modifiés,
  - les produits à base de résines synthétiques ;
- **produits à base de liants hydrauliques :** mortiers et bétons constitués de liants hydrauliques et de granulats. Éventuellement des adjuvants peuvent être utilisés ;
- **produits à base de liants hydrauliques modifiés :** mélanges généralement prédosés en usine, composés de liants hydrauliques, de granulats, modifiés par des ajouts de résines synthétiques. Des fibres peuvent être incorporées au mélange. La composition de ces mélanges, y compris le dosage en eau, doit être parfaitement définie par le fabricant dans le cas de mélanges prédosés ;
- **produits à base de résines synthétiques :** mélanges constitués de granulats et d'une résine synthétique constituant le liant et éventuellement d'ajouts et/ou de fibres ;

Rappel :

> Les exigences auxquels les produits et matériaux listés ci-après doivent satisfaire figurent dans l'article 3.3.5 ci-après :

- les granulats pour béton ;
- les liants hydrauliques ;
- les additions ;
- les fibres
- les adjuvants ;
- l'eau de gâchage ;
- les résines synthétiques.

[8] *Cette norme date de novembre 1993.*

1.2.2 LES PRINCIPALES DÉFINITIONS DE LA NORME HOMOLOGUÉE NF EN 1504-1[9]

- **produit :** constituant formulé pour la réparation ou la protection des structures en béton ;
- **système :** ensemble de deux ou plusieurs produits utilisés conjointement ou consécutivement, pour effectuer des réparations ou pour protéger les structures en béton ;
- **produits et systèmes de réparation non structuraux :** produits et systèmes qui, appliqués sur une surface de béton, restituent l'aspect géométrique ou esthétique de la structure ;
- **produits et systèmes de protection d'armature :** produits et systèmes appliqués à une armature non protégée afin d'assurer sa protection contre la corrosion.
- **produits et systèmes de collage :** produits et systèmes appliqués au béton pour établir une liaison structurale durable avec les matériaux supplémentaires qui lui sont appliqués.
- **produits et systèmes de réparation structuraux :** produits et systèmes appliqués à une structure en béton pour remplacer le béton défectueux et pour restituer à la structure son intégrité et sa durabilité ;
- **additions :** matériaux inorganiques finement broyés pouvant être ajoutés aux produits de réparation pour en améliorer certaines propriétés ou pour leur conférer des propriétés particulières. Il existe deux types d'additions :
  - les additions pratiquement inertes (type I),
  - les additions pouzzolaniques ou hydrauliques latentes (type II) ;
- **ajouts pour liants hydrauliques :** produits qui sont ajoutés à un liant hydraulique afin de lui conférer des caractéristiques spécifiques et qui n'entrent pas dans la catégorie des adjuvants et des additions ;
- **ajouts pour polymères réactifs :** produits autres que les adjuvants et les additions qui confèrent au produit de réparation des propriétés spécifiques ;

NOTE : *Les ajouts couramment utilisés sont, par exemple, les plastifiants, les assouplissants, les accélérateurs, les retardateurs, les matériaux permettant d'adapter la rhéologie, les pigments, les fillers.*

- **adjuvant :** matériau en quantité inférieure à 5 % en masse de la teneur en ciment du béton, ajouté pendant la procédure de malaxage du béton pour modifier les propriétés du mélange lorsque le béton est frais ou durci ;
- **liant hydraulique (H) :** matériau inorganique qui réagit à l'eau et qui subit une réaction d'hydratation pour produire un matériau solide ;

NOTE : *Il existe des ciments conformes aux normes NF EN 197-1 et NF EN 413-1 et des chaux de construction conformes à la norme NF EN 459-1 ou combinées avec certains ciments*[10].

[9] *Cette norme date de décembre 2005.*

[10] *Attention, la norme NF EN 197-1 ne vise pas les ciments pour travaux à la mer (NF P 15-317) ni ceux pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates (NF P 15-319) ni ceux pour travaux en pays tropicaux...*

- **mortier ou béton hydraulique (CC) :** mortier ou béton à base de liant hydraulique mélangé à des granulats calibrés, qui peut inclure des adjuvants et des additions et dont, après mélange, la prise se fait par réaction d'hydratation;

- mortier ou béton de ciment hydraulique polymère (PCC) : mortier ou béton hydraulique modifié par l'incorporation de polymères ajoutés en quantité suffisante pour lui conférer des propriétés spécifiques;

NOTE : les polymères généralement utilisés sont :
- les acryliques, les méthacrylates ou les résines acryliques modifiées sous forme de poudres redispersables ou de dispersions aqueuses,
- les mono-, co- ou ter-polymères de vinyle sous forme de poudres redispersables ou de dispersions aqueuses,
- les copolymères styrène-butadiène, généralement sous forme de dispersions aqueuses, les latex de caoutchouc naturel,
- les résines époxydes.

- **mortier et béton polymères (PC) :** mélange de liant polymérisable et de granulats calibrés dont la prise se fait par réaction de polymérisation ;

- **liant polymère réactif (P) :** liant constitué en général de deux composants, une base réactive et un durcisseur ou un catalyseur qui polymérisent à température ambiante. Des ajouts peuvent également être incorporés ;

NOTE 1 : *dans certains systèmes, la vapeur d'eau à température ambiante peut agir comme durcisseur.*

NOTE 2 : *les liants couramment utilisés sont, par exemple, les résines époxydes, les polyesters insaturés, les acryliques réticulables, les polyuréthannes monocomposant ou bicomposants.*

NOTE 3 : *les sigles utilisés dans le présent guide font souvent référence au guide technique de 1996 du LCPC-SETRA relatif au choix et à l'application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton et peuvent différer de ceux qui ont été adoptés par la norme européenne. Les correspondances entre les sigles, les abréviations et les noms sont données par le tableau ci-après.*

Guide 1996	Norme européenne	Produits (mortiers ou bétons à base de :)
LH	CC	Liant hydraulique (H)
EP	non utilisé	Résines époxydes
LHM	PCC	Liant hydraulique (H) modifié par polymère (P)
LR	PC	Polymères (P) («résines»)
PMMA	non utilisé	Polyméthacrylate de méthyle
PUR	non utilisé	Résines polyuréthanes

Tableau n° 2 : comparaison des sigles des produits en France et en Europe

1.2.3 LES PRINCIPALES DÉFINITIONS DE LA NORME HARMONISÉE NF EN 1504-3[11]

- **produit d'accrochage :** constituant d'un système de réparation utilisé pour améliorer l'adhérence d'un mortier ou d'un béton de réparation sur un support en béton de manière à créer une liaison permanente insensible, en service, à l'humidité et aux bases fortes ;

- **temps de raidissement :** temps au-delà duquel l'ouvrabilité d'un béton ou d'un mortier de réparation à base de liants hydrauliques ou à base de liants hydrauliques modifiés est perdue.

[11] *Cette norme date de décembre 2005.*

1.2.4 LES PRINCIPALES DÉFINITIONS DE LA NORME HARMONISÉE NF EN 1504-7

- **revêtements actifs :** revêtements contenant des pigments électrochimiquement actifs, susceptibles d'agir comme inhibiteurs ou pouvant assurer une protection cathodique localisée (par exemple, le ciment sous forme d'une barbotine doit être considéré comme un pigment actif du fait de son alcalinité) ;
- **revêtements étanches :** revêtements qui isolent l'armature de l'eau interstitielle dans la matrice environnante à base de ciment.

1.2.5 LES PRINCIPALES DÉFINITIONS DE LA NORME HARMONISÉE NF EN 1504-8

- **essai d'identification :** essai visant à vérifier une valeur déclarée concernant la composition ou une propriété du produit ou du système en termes de cohérence de la production ;

NOTE : *cet essai a pour objet de garantir que le produit ou le système soumis à l'essai correspond au produit ou au système qui a été soumis à l'essai initial de type, dans la limite des tolérances admises.*

- **essai de performance :** essai visant à vérifier une valeur attribuée à une propriété donnée du produit ou du système concernant ses performances spécifiées pendant l'application et l'utilisation ;

NOTE : *cet essai a pour objet de garantir que le produit ou le système est conforme à ses caractéristiques de performance spécifiées.*

- **valeur déclarée :** valeur déclarée et consignée par écrit par le fabricant à des fins d'identification ou d'exigences de performance.

1.2.6 LES PRINCIPALES DÉFINITIONS DE LA NORME EXPÉRIMENTALE XP ENV 1504-9[12]

- **revêtements actifs pour armature :** revêtements appliqués à l'armature, contenant des pigments électrochimiquement actifs, susceptibles d'agir comme inhibiteurs de corrosion ou qui, par réaction galvanique sacrificielle, peuvent assurer une protection cathodique localisée (par exemples, le chromate de zinc, le ciment du fait de son alcalinité…).
- **revêtements de protection pour béton :** revêtements appliqués à la surface du béton pour former un film superficiel réduisant la pénétration de l'eau (H_2O), du gaz carbonique (CO_2), des chlorures (Cl^-), etc. (par exemple, les silanes et les silicates…).

[12] *Cette norme date de mars 2005. Elle est en cours de révision.*

1.2 Les définitions

- **revêtements de protection pour armatures :** revêtements appliqués à l'armature dans le but de la protéger contre l'eau interstitielle dans le mortier et le béton environnants.
- **défaut :** état inacceptable qui peut être intrinsèque ou résulter d'une détérioration ou d'un dommage
- **durée de vie théorique :** temps utile souhaité dans les conditions prévues d'utilisation de la structure en béton
- **maintenance :** mesures récurrentes ou continues de protection
- **passif / passivité :** état dans lequel l'acier, sous la protection d'une couche d'oxyde, ne rouille pas spontanément
- **protection :** mesure qui empêche ou réduit le développement des défauts
- **réparation :** mesure de correction des défauts
- **vie utile :** période de réalisation de la performance prévue
- **substrat :** surface sur laquelle est appliqué, ou doit être appliqué, un matériau de protection ou de réparation.

2

Documents de référence

L'évolution continuelle des documents de référence et, en particulier, des normes rend très rapidement caduc tout document imprimé. La liste complète des documents de référence visés dans le présent guide a donc été reportée dans **l'annexe n°1** avec **les dates de valeur de ces documents.** On notera cependant que les références normatives d'un certain nombre de textes, y compris certaines normes, ne sont pas à jour comme le montre l'exemple ci-après.

Exemple : la norme **NF P 95-101** fait référence à des normes obsolètes dans le domaine des granulats. En effet, la norme **NF P 18-103** a été remplacée par la norme **NF EN 12620** (annexe ZA et marquage CE), ainsi que par la norme **XP P 18-545** qui explicite les conditions d'application de la précédente. De plus, les nouvelles normes ciments **(NF EN 197-1, NF EN 197-2, NF EN 197-3 et NF EN 197-4)** n'y sont pas visées.

Il est fait référence dans les différents chapitres du présent guide, à un certain nombre de textes actuellement en vigueur (normes, DTU et fascicules du CCTG…). **Du fait de la parution des nouvelles normes européennes,** certains de ces textes vont devoir être modifiés ou retirés ces prochaines années. Le présent guide prend cependant en compte, si nécessaire, certaines des modifications ainsi apportées. De plus, dans la mesure du possible, ce guide pointe les textes dont les références normatives ne sont pas à jour.

Ces modifications ou retraits concernent également **les autres guides de la famille [FABEM]** car les normes européennes relatives **aux produits** (1504-2, 1504-3, 1504-4, 1504-5 et 1504-6) vont se substituer **presque entièrement**[13] aux normes françaises correspondantes **(18-821, 18-822, 18-840, 18-870, 18-880)** de la série P 18-8**. À noter que la norme **NF EN 1504-7** sur les produits de protection contre la corrosion n'a pas d'équivalence dans la série des normes **P 18-8****.

Ces normes européennes font références à des **normes d'essais** européennes ou internationales (ISO) qui vont donc remplacer, **mais pas toutes,** les normes d'essais de la série **P 18-8****. En effet, certaines normes françaises n'ont pas d'équivalence.

La norme européenne **NF EN 1504-10 de mise en œuvre et de contrôle sur chantier des produits et systèmes,** complétée par la norme expérimentale **XP ENV 1504-9** (conditions d'utilisation des produits et systèmes), recouvre partiellement le champ des normes françaises de la série **P 95-1**** qui vont devoir être toilettées.

>Les mises à jour de la liste des documents de référence peuvent être trouvées sur les sites des organismes suivants :

- l'Association pour la Certification et la Qualification en Peinture Anticorrosion (ACQPA) ;
- l'Association Française de Génie Civil (AFGC) ;
- l'Association Française de Normalisation (AFNOR) ;
- l'Association pour la Qualité de la Précontrainte et des Équipements (ASQPE) ;

[13] *I existe une norme européenne sur les produits de scellement (1504-6) mais pas sur les produits de calage. Les deux normes françaises* ***P18-821 et P18-821*** *(produits de calage et scellement) resteront en partie applicables après révision.*

- l'Association pour la Qualité de la Projection des Mortiers et Bétons (ASQUAPRO) ;
- le Centre Français de l'Anticorrosion (CEFRACOR) ;
- le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) ;
- la Fédération Française du Bâtiment (FFB) ;
- la Fédération des Travaux Publics (FNTP) ;
- le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) ;
- Légifrance ;
- l'Office Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics (OPPBTP) ;
- le Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA ou Sétra) ;
- le Syndicat National des Joints et Façades (SNJF) ;
- le Syndicat National des Entrepreneurs Spécialistes de Travaux de Réparation et Renforcement de Structures (STRRES) ;
- etc.

> Les coordonnées de ces différents sites sont disponibles dans une annexe au GUIDE GÉNÉRAL.

Rappel important : en général, les normes et les guides ne fixent ni le rôle de chacun des intervenants, ni les conditions de choix des produits et de leur mise en œuvre, ni la consistance exacte des épreuves d'étude, de convenance ou de contrôle (par exemple, types et nombre d'essais). Ils ne traitent pas non plus de ce qui relève des contrôles internes ou externes ou extérieurs à l'entreprise, etc. **Il appartient donc au marché de fixer les exigences correspondantes.**

Il est rappelé que, dans **un marché,** la contractualisation d'un texte tel qu'un guide, **un fascicule de CCTG, un DTU, une norme…** doit le plus souvent être complétée par des exigences additionnelles adaptées aux dispositions du texte et aux conditions de réalisation des travaux de réparation ou de renforcement à effectuer. Par exemple :

- dans un guide, seules certaines parties relèvent de la contractualisation ;
- dans **un DTU**, la liste des travaux relatifs au corps d'état concerné par celui-ci est fixée. **Le DTU** attribue à d'autres corps d'état certains des travaux préparatoires. Enfin, il renvoie **aux documents particuliers du marché (DPM)** pour fixer certains des travaux du corps d'état qui n'ont pas été retenus dans la liste susvisée (ce point est explicité dans la remarque ci-après à cause de son incidence sur la rédaction des pièces **de marché) ;**
- dans une norme, plusieurs niveaux de performances peuvent être proposés, un choix est donc à faire ;
- dans une norme, les conditions climatiques (température et hygrométrie) retenues pour les essais des produits peuvent ne pas correspondre à celles qui seront enregistrées sur le site de l'ouvrage lors de la mise en œuvre des produits…

L'extrait ci-après du tableau n° 3 de la norme harmonisée **NF EN 1504-3** montre la nécessité de fixer si le produit est destiné à une réparation structurale ou non structurale ainsi que **les niveaux de performance** attendus. En effet, deux classes sont proposées par type de réparation (R 1 et R 2 pour les réparations non structurales et R 3 et R 4 pour les réparations structurales). La fixation des niveaux de performance relève normalement des normes nationales. Pour certaines applications spécifiques, des performances plus élevées sont à exiger (par exemple, la norme française **XP P 18-840** vise trois classes d'adhérence dont l'une dépasse 3 MPa[14], alors que la norme européenne se limite à 2 MPa).

Point n°	Caractéristiques et performances	Support de performance	Méthode d'essai	Exigence			
				Structurale		Non structurale	
				Classe R 4	Classe R 3	Classe R 2	Classe R 1
1	Résistance en compression	Aucun	NF EN 12190	≥ 45 MPa	≥ 25 MPa	≥ 15 MPa	≥ 10 MPa
3	Adhérence	MC(0,40)	NF EN 1542	≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa	
5	Résistance à la carbonatation	Aucun	NF EN 13295	d_k ≤ béton témoin (MC(0,45)) (*)		Aucune exigence	

Tableau n° 3 : extrait de la norme EN 1504-3

Nota : *(*) le sigle MC (0,45) correspond à l'un des supports de référence de la norme* ***NF EN 1766.***

Remarque importante : ***un marché de bâtiment*** *est décomposé le plus souvent en plusieurs lots attribués à différents corps d'état.* ***Un marché de génie civil*** *fait appel le plus souvent à une entreprise générale ou à un groupement d'entreprises. Les textes officiels concernant ces deux domaines ont donc été rédigés en conséquence. Il faut en tenir compte lors de la rédaction* ***d'un marché*** *de réparation. Dans la mesure du possible le* ***présent guide*** *attire l'attention sur les particularités des deux domaines.*

[14] Parmi les produits admis à la Marque NF-Produits spéciaux plusieurs ont un niveau d'adhérence de classe 3 (≥ 3 MPa). Tous ces produits sont à base de résines synthétiques.

3

Préparation générale de l'opération

3.1 Généralités

3.2 Etudes préliminaires - Méthodologie à suivre

3.3 Choix des produits, systèmes et procédés de réparation structurale ou non

3.4 Conditionnement des produits

3.5 Transport et stockage des produits

3.6 Matériels à utiliser

L'entrepreneur fait mettre en place **les moyens d'accès et les équipements d'hygiène et de sécurité** sur le lieu où la mise en œuvre d'un produit ou d'un système de réparation du béton est prévue, en respectant les dispositions du marché, la législation en vigueur et les consignes **du chargé des ouvrages provisoires (COP) et du coordonnateur sécurité et protection de la santé (coordinateur SPS).**

Figure n° 3 : la préparation d'une opération de réparation par l'entrepreneur

> L'entrepreneur doit prendre connaissance et disposer en permanence des documents de la liste suivante non limitative :

- les normes en vigueur et les autres documents de référence qui sont cités dans le présent guide (se reporter en **annexe n°1** aux tableaux des textes de référence). Les contrôles demandés doivent être adaptés, si nécessaire, à la technique de traitement retenue en l'absence de norme spécifique ;
- les articles **du marché** relatifs à l'exécution de la réparation ;
- la procédure relative à l'exécution de la réparation ;
- le cadre du document de suivi de l'exécution de la réparation ;
- la fiche technique (ou notice d'emploi) de chacun des produits constituant le système de réparation ;
- la fiche de données sécurité (FDS) de chaque produit dont la présence sur le chantier est imposée par la réglementation ;
- la fiche technique et le carnet d'entretien des différents matériels nécessaires (par exemple, outils de mélange des produits, moyens de pesée, outils de mise en œuvre des produits, etc.) ;
- etc.

> L'entrepreneur doit organiser, exécuter et contrôler toutes les opérations suivantes :

- celles relatives à l'assurance de la qualité ;
- celles qui doivent précéder l'application des produits ou systèmes de réparation ;
- celles qui doivent suivre l'application des produits ou systèmes de réparation ;
- celles relatives aux interventions **du laboratoire** chargé de certaines épreuves et de certaines mesures ;
- l'amenée et la mise en place des moyens d'accès et des équipements d'hygiène et de sécurité ;
- l'approvisionnement des matériaux et produits nécessaires ;
- l'amenée et la mise en place des matériels nécessaires à l'opération ;
- la réalisation du relevé contradictoire avec **le maître d'œuvre** de l'état :
  - **soit du support,** qui est à reporter sur un plan avec les fissures éventuelles à traiter (numérotation, longueur, ouverture, activité ou non, etc.), les épaufrures, les armatures apparentes… Un tel relevé s'impose lorsque les réparations à effectuer concernent des désordres superficiels,
  - **soit de tout ou partie de la structure,** si les réparations à effectuer concernent des désordres structuraux. Dans un tel cas, le relevé des désordres doit être complété par les dispositions à prendre lors des travaux pour mettre en sécurité l'ouvrage (par exemple, le phasage des diverses opérations de démolition et de réparation, les étaiements provisoires…) ;
- la mise en œuvre des moyens de mesure destinés à contrôler l'efficacité du traitement de la dégradation mais aussi, si besoin est, les moyens de contrôle de la stabilité de l'ouvrage en cours de travaux ;
- etc.

Rappel : la remise au maître d'œuvre des procédures et des cadres des documents de suivi conditionne la levée d'un POINT D'ARRÊT

3.2.1 GÉNÉRALITÉS

Comme **l'introduction commune** à l'ensemble des guides du STRRES le rappelle, l'expérience montre que, pour les opérations de reprise des bétons dégradés, dans **un certain nombre de cas, soit les réparations ne tiennent pas, soit de nouveaux désordres apparaissent à proximité des réparations, soit il se produit lors des travaux des dérapages dans les quantités et les coûts.** Toutes ces déconvenues sont, le plus souvent, dues à la faiblesse du diagnostic lors des études préliminaires.

En effet, certains **maîtres d'ouvrage** croient qu'il suffit de traiter **les désordres apparents** (par exemple, les épaufrures, les éclatements, les armatures apparentes rouillées…) pour résoudre les problèmes et, qu'en conséquence, les études préliminaires portent uniquement sur **le relevé des désordres visibles** et sur le métré qui s'y rapporte.

Il a donc été décidé de rappeler, dans le corps du présent guide, **le processus à suivre pour aboutir à une action de réparation.** Ce processus passe par **des étapes incontournables** qui ont été développées dans **le guide technique de 1996** édité par le **LCPC** et dans **le guide de novembre 2003** édité par **l'AFGC.** Ces deux documents sont listés dans **l'annexe n°1** relative aux documents de référence.

Photo n° 1 : le guide LCPC-SETRA de 1996 et le guide de l'AFGC de 2003 (crédit photo AFGC, LCPC et SETRA)

Toute opération de réparation a pour origine la prise en compte **d'observations alarmantes sur l'aspect d'une partie de bâtiment ou d'ouvrage.** L'alerte peut être donnée par un inspecteur s'il s'agit d'un ouvrage régulièrement surveillé mais c'est le plus souvent un usager ou un tiers qui aperçoit une ou des fissures, des morceaux de béton qui se détachent ou encore le gestionnaire qui intervient, par exemple, après un choc accidentel important ou un incendie.

Remarque importante : *la suite du texte va montrer que les dégradations engendrées par la corrosion des armatures (cause très fréquente des désordres constatés sur les ouvrages) nécessitent* ***des investigations sérieuses et des méthodes de réparations relativement complexes, si on veut obtenir des résultats durables.*** *Il serait préférable d'agir dans le cadre* **d'un entretien préventif** *avant que les désordres ne se manifestent.*

Des techniques d'investigation préventives existent. *Elles sont rappelées dans la suite du présent texte et dans* **le guide de novembre 2003 de l'AFGC** *(réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion). Elles permettent de détecter les risques de corrosion pendant la* ***période dite «d'incubation»*** *lorsque la corrosion n'est pas encore amorcée. Durant cette période, il est possible de stopper la pénétration des agents agressifs* ***à moindre coût,*** *par exemple, par la mise en œuvre de revêtements de protection visés par* ***le GUIDE N°4 [FABEM]...***

Ces premières observations demandent évidemment à être approfondie et on entre alors dans **le processus en six étapes** présenté dans **le guide technique de 1996**, auquel il convient d'ajouter, en 4ème position, une nouvelle étape concernant **la mise en sécurité de l'ouvrage** en attendant les travaux ou pendant ceux-ci :

1. **la détection de la dégradation ;**
2. **l'auscultation – le diagnostic – le pronostic ;**
3. **l'établissement du projet de réparation ;**
4. **la mise en sécurité de l'ouvrage ;**
5. **la mise en œuvre des produits ;**
6. **les contrôles et vérifications des résultats ;**
7. **la surveillance.**

La deuxième étape qui porte sur **«l'auscultation – le diagnostic – le pronostic»** est essentielle. Elle doit permettre d'identifier la maladie, d'en estimer l'étendue et d'en identifier les causes. La qualité de ce diagnostic revêt une grande importance pour la réussite ou l'échec de la réparation, notamment sa durabilité.

Ce processus est développé, ci-après, dans les articles 322 à 326. Il sert d'introduction commune aux guides de la famille [FABEM].

3.2.2 LES MANIFESTATIONS DES DÉSORDRES

En allant du plus bénin au plus grave, il est possible de distinguer :

- les défauts sans conséquences importantes, telles que variations de teintes sur un même parement, efflorescences, taches noires, pommelages, fuites de laitance, bullage, marbrures, fissures superficielles, … ;
- les défauts indiquant que l'évolution risque de se faire anormalement : carbonatation, ressuage, nids de cailloux, faïençage,… ;
- les défauts indiquant une évolution plus ou moins avancée : écaillage, fissuration, délamination… ;
- les défauts traduisant une modification du fonctionnement de la structure et ayant donc une incidence structurale : fissuration importante, déformation excessive… ;
- les défauts structuraux indiquant la proximité d'un état limite ultime et nécessitant une restriction de l'usage de l'ouvrage, voire sa mise hors service.

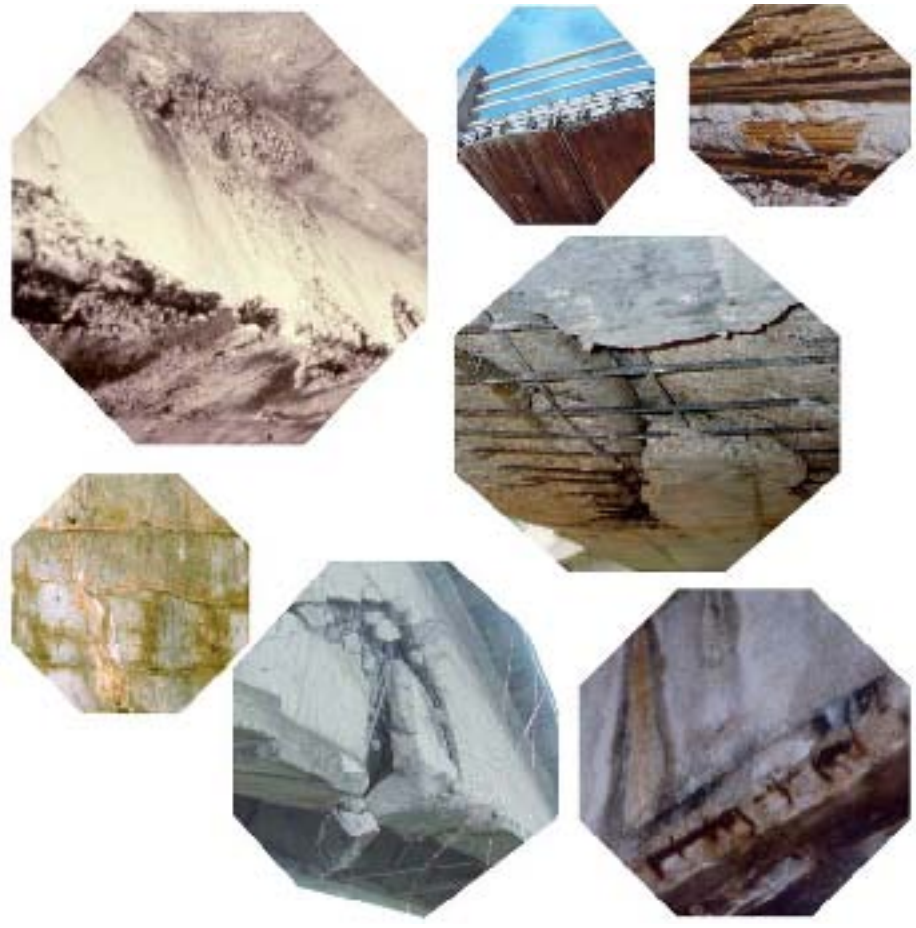


Photo n° 2 : différents désordres de structures en béton armé et précontraint (photomontage)

3.2.3 LES PRINCIPALES CAUSES DE DÉGRADATION DES BÉTONS

3.2.3.1 Généralités

> Les principaux désordres rencontrés sur les ouvrages de génie civil et dans les bâtiments en béton peuvent être attribués :

- **au «vieillissement» de la structure** en question, mais en réalité ce mot peut cacher, pudiquement, un sérieux manque d'entretien ;
- **à des causes accidentelles :** chocs, incendies, surcharges, etc.
- **à des erreurs de conception, de construction, de réparation...**

> Cette classification est importante pour instruire le dossier mais, pour traiter les désordres, il est préférable de classer les causes d'abord selon les mécanismes mis en jeu, c'est-à-dire selon qu'ils sont la conséquence :

- d'altérations d'origine physique ;
- d'altérations d'origine chimique ;
- de sollicitations mécaniques excessives.

> Il faut préciser, ensuite, si les causes sont :

- d'origine purement mécanique ;
- issues d'erreurs de conception, d'exécution ou de gestion (par exemple, insuffisance d'entretien, erreur commise lors d'une réparation...).

3.2.3.2 Causes physiques de dégradation des bétons

3.2.3.2.1 La dégradation des bétons par l'action du gel

Elle se traduit par l'écaillage qui concerne la peau du béton et des gonflements du corps de la pièce accompagnés généralement de fissuration en réseau, éventuellement même de désagrégation complète du béton. Les effets du salage aggravent les dommages au béton et provoquent en plus la corrosion des armatures.

Photo n° 3 : bétons affectés par le gel interne (crédit photo D. Poineau)

Photo n° 4 : béton affecté par l'écaillage (crédit photo D. Poineau)

3.2.3.2.2 La dégradation des bétons par l'action des différents retraits

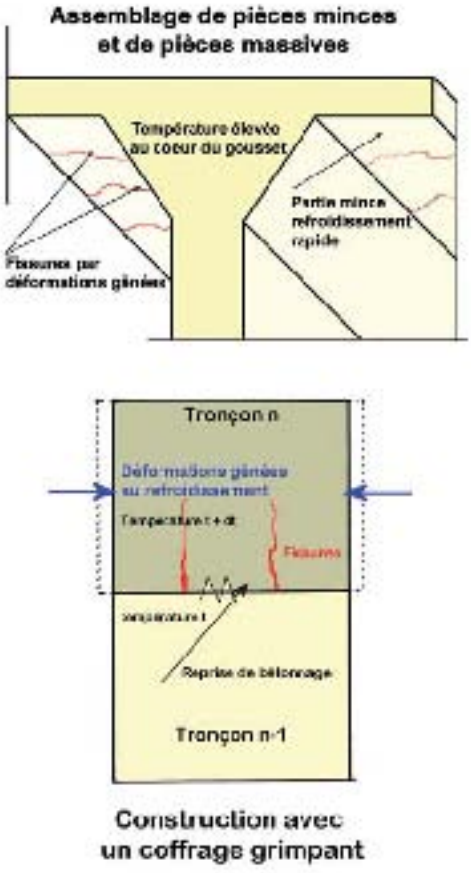


Figure n° 4 : incidences des retraits sur les pièces minces et massives et dans les zones de reprises de bétonnage

> Dès son début de prise, le béton subit différentes actions qui peuvent se combiner et provoquer des fissures :

- la sédimentation, lors de sa prise, d'un béton mal formulé, qui provoque des cassures dans le béton frais dites aussi **fissures de ressuage ;**

- **les gradients thermiques** qui existent, entre le cœur du béton et sa peau, ou entre les parties minces et les parties massives d'une pièce ;

- **le retrait endogène** qui est une réduction de volume due à la formation de différents cristaux lors de la prise et du durcissement du béton (silicate calcique hydraté ou C-S-H, ettringite…) ;

- **le retrait par dessiccation du béton au jeune âge** (l'absence de cure ou une cure mal conduite sont à l'origine des fissures qui en résultent) ;

- **le retrait par dessiccation de la peau du béton pendant la vie de l'ouvrage.** L'absence ou l'insuffisance des armatures de peau permet aux fissures de s'ouvrir largement.

3.2.3.2.3 La dégradation des bétons d'origine thermique

Ces dernières années, des incendies dramatiques ont montré que les règles sur la sécurité dans les tranchées couvertes et les tunnels étaient à revoir et ont montré qu'un incendie pouvait provoquer de graves désordres aux bétons des ouvrages de génie civil (incendie du tunnel sous la Manche le 18 novembre 1996, incendie du tunnel du Mont-Blanc le 24 mars 1999…).

Lors d'un incendie ou d'un choc thermique, l'eau interstitielle se transforme en vapeur et, si cette vapeur ne peut s'échapper assez rapidement, la pression de vapeur devient supérieure à la résistance en traction du béton, ce qui provoque une sorte d'écaillage de ce dernier. Cet écaillage progresse vers le cœur du matériau tant que l'incendie n'est pas maîtrisé et tant que la température du béton reste élevée.

Plus le béton a une perméabilité et une porosité réduites, plus les destructions sont importantes. Par exemple, lors de l'incendie du tunnel sous la Manche, dans la zone du sinistre, les voussoirs de 60 cm d'épaisseur en BHP de classe 60 ont été fortement endommagés.

De plus, si la température que subit le béton est très élevée, il se produit une destruction locale du matériau par décomposition de ses constituants et une forte chute du module d'Young. En effet, dès que la température du béton atteint :

- 110°C, les hydrates de la pâte de ciment commencent à se décomposer ;

- à 573°C, la température de fusion du quartz est atteinte ;

- à 800°C, le carbonate de chaux (CaCO3) se décarbonate avec libération de chaux vive, les granulats calcaires perdent une partie de leur cohésion, etc.

Photo n° 5 : béton après un incendie (crédit photo CETU)

Il faut également se préoccuper de l'effet de l'incendie **sur les armatures de béton armé,** en particulier s'il s'agit **d'aciers doux écrouis par traction et torsion ou par torsion seule** utilisés entre les années 50 et 80. En effet, une température forte peut recuire les aciers avec une forte chute (de l'ordre de 15 à 18 %) de leur limite élastique. Le même phénomène existe pour les aciers plus récents élaborés par trempe et revenu. Cet effet est sensible si la température des armatures atteint 350°C (300°C pour être prudent, car il dépend aussi du temps de maintien de la température au niveau de l'acier).

> En cas d'incendie important, des investigations spécifiques doivent donc être menées aussi bien sur le béton que sur les armatures[15]

3.2.3.2.4 La dégradation des bétons par érosion ou usure

Ces désordres peuvent apparaître lorsque des véhicules roulent directement sur le béton, dans les évacuateurs de crues sous l'action de l'abrasion engendrée par l'eau, dans les traverses de chemin de fer sous l'action des efforts apportés par les rails et le ballast lors du passage des trains…

3.2.3.3 Causes chimiques de dégradation des bétons

3.2.3.3.1 Généralités

Dans cette catégorie, il est possible de distinguer **deux cas** selon que les agresseurs sont **des agents externes ou internes** au béton.

> Les principaux agents externes sont :

- les eaux pures ;
- les milieux acides ;

[15] *Se reporter au document du LCPC intitulé «Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie» Méthodes d'essais des LPC n°62 – décembre 2005.*

- les eaux alcalines ;
- les solutions salines :
  - les sulfates,
  - les chlorures,
  - les nitrates,
  - les sulfures ;
- l'eau de mer ;
- certains milieux biologiques.

Le fascicule de documentation **FD P 18-011** donne **la classification des environnements agressifs** pour les bétons. Le **degré d'agressivité** des solutions (eaux) et aussi des sols (noté de : A1 à A4) est fonction de la concentration en agents agressifs et du pH des solutions et des sols. Ce document donne également le niveau de protection à assurer (noté de 1 à 3), ainsi que **les mesures à prendre** pour **la confection des bétons,** voire **leur protection** par des revêtements.

> Certains agents internes peuvent être responsables de réactions chimiques dites de gonflement interne (RGI) :

- l'alcali-réaction (AR), lorsque certains granulats réagissent avec les ions alcalins présents dans les constituants du béton ;
- la réaction sulfatique interne (RSI), soit lorsque les granulats contiennent des agents pathogènes comme des sulfates, soit lorsque l'ettringite primaire ne se forme pas lors de la prise du béton, en particulier par excès de température pendant celle-ci.

Aux causes chimiques de dégradation du béton, il faut ajouter les effets **de la corrosion des armatures** sous l'action de phénomènes électrochimiques (un béton sain est nécessaire pour que les armatures soient protégées). Ce phénomène, largement développé dans **le guide de novembre 2003** de **l'AFGC** relatif à la réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion, sera évoqué dans le paragraphe 3.2.3.3.8 ci-après du présent guide.

3.2.3.3.2 La dégradation des bétons par les eaux pures et les milieux acides

Le ciment hydraté présent dans le béton contenant de la chaux (la portlandite) provoque un équilibre très basique (pH compris entre 12,6 et 13,7). Il passive alors parfaitement l'acier vis-à-vis de la corrosion.

Les eaux pures, voire légèrement acides, lorsqu'elles entrent en contact avec le béton, dissolvent la chaux produite par l'hydratation du ciment, elles font alors progressivement diminuer le pH et annihilent ainsi la passivation des aciers mais aussi la résistance du béton. D'autres constituants du béton, tel que le silicate calcique hydraté ou C-S-H, les aluminates de calcium peuvent également être attaqués. La présence de dépôts de calcite blanchâtre à la surface du béton est le signe d'une telle attaque.

Nota : *le terme général* ***de lixiviation du béton*** *employé par les spécialistes recouvre les termes suivants :*

- *phénomènes mécaniques d'érosion ;*
- *phénomènes physiques de transfert d'ions par diffusion (gradients de concentration) ou par perméation (gradients de pression) ;*
- *phénomènes chimiques de réactions.*

Les eaux acides qui ont une action importante de dissolution du ciment et de granulats calcaires sont principalement les solutions d'acides forts (les acides chlorhydrique, nitrique et sulfurique). Plus le pH est faible plus l'attaque est importante.

Dans les bâtiments industriels, les attaques du béton de la structure peuvent être dues à d'autres acides que les acides forts. Il s'agit, par exemple, des acides acétique, lactique, butyrique, formique en provenance de sucreries, laiteries, papeteries, tanneries…

Les acides humiques, contenus dans les eaux des sols tourbeux, les eaux des forêts de pins…, sont faiblement agressifs mais, comme ils se trouvent partout, ils sont potentiellement dangereux.

Photo n° 6 : traces de calcite (crédit photo D. Poineau)

3.2.3.3.3 La dégradation du béton par les eaux basiques

Les bétons à base de ciment Portland résistent bien aux eaux alcalines à faible concentration (< 10%). Cependant, même pour de faibles concentrations, lorsque le béton est en contact sur une face avec la solution basique et que l'autre face est soumise à évaporation, il peut y avoir des désordres par accumulation des sels. Par ailleurs, les bétons à base de **ciments alumineux** sont attaqués jusqu'à destruction totale par les eaux basiques.

Les eaux basiques, par leur apport d'alcalins, peuvent favoriser des réactions de gonflement interne ou RGI (voir l'article 3.2.3.3.7 ci-après).

3.2.3.3.4 La dégradation du béton par les solutions salines ou les sols

L'agression des solutions salines et des sols est fonction, d'une part, **des cations** et, d'autre part, **des anions** des sels dissous.

Ici ne sont traités que **les agents agressifs les plus courants,** qui se présentent sous forme gazeuse, liquide ou solide dans l'atmosphère, les eaux et les sols.

3.2.3.3.4.1 Effets des cations les plus agressifs

Le magnésium sous forme de sulfates ou de chlorures dissout partiellement les éléments calciques des ciments et forme de la brucite ($Mg(OH)_2$) sans résistance notable.

L'ammonium sous forme de sulfates, chlorures et nitrates agit de la même façon que le magnésium sur les ciments.

3.2.3.3.4.2 Effets des anions les plus agressifs

> Cas des sulfates :

Il s'agit ici d'un phénomène d'expansion créé par l'attaque de l'aluminate tricalcique (C3A) du ciment par **les sulfates** qui provoque la formation de cristaux d'ettringite ou sulfo-aluminate de calcium hydraté à 32 molécules d'eau par mole. Ce produit expansif est aussi appelé «sel de Candlot».

Les sulfates se trouvent un peu partout : l'anhydride sulfureux (SO_2), présent dans l'atmosphère urbaine notamment, s'oxyde en présence d'humidité pour donner l'acide sulfurique et les sulfates ; l'eau de mer, les eaux «séléniteuses» provenant de sous-sols riches en gypse, de sols alluviaux et argileux, de remblais utilisant, soit des matériaux de démolition (donc du plâtre), soit des matériaux en provenance de terrils chargés en sulfures et sulfates, de certains engrais (sulfates d'ammonium, de potassium et de magnésium), etc. À cela s'ajoutent les pyrites, présentes quelquefois dans les granulats du béton, qui s'oxydent facilement en sulfates très réactifs.

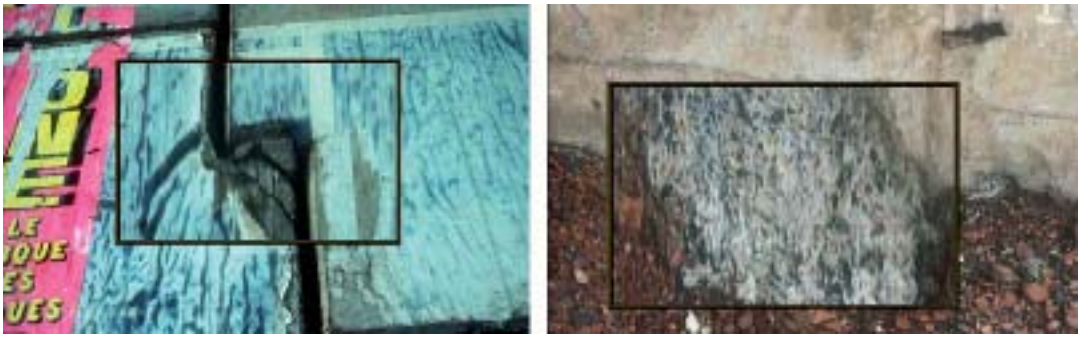


Photo n° 7 : dégradations du béton par une attaque sulfatique externe (crédit photo LCPC)

L'effet est différé mais se traduit par :

- une fissuration et un «pourrissement» dus aux pressions de cristallisation de l'ettringite ;
- l'accentuation de la pénétration des sulfates dans les fissures ;

- la progression de l'attaque suivant un front de dégradation dont l'épaisseur a tendance à s'élargir au cours du temps ;
- la destruction plus ou moins complète du béton.

> Cas des chlorures :

Les chlorures présents dans l'eau de mer et dans les fondants routiers (sels de déverglaçage) sont souvent à l'origine des corrosions sévères des armatures. Ils peuvent aussi provoquer certaines réactions chimiques plus ou moins destructrices du béton :

- le chlorure de calcium (Cl_2Ca) forme avec l'aluminate tricalcique (C_3A) des chloroaluminates ;
- le chlorure de magnésie donne un précipité de brucite ($Mg(OH)_2$ et du chlorure de calcium soluble ;
- en présence de sulfates, il se forme de l'ettringite gonflante ;
- en présence de gaz carbonique et de silice, de la thaumasite gonflante…

> Cas des nitrates :

Les nitrates sont en général faiblement agressifs sauf le nitrate d'ammonium qui est fortement agressif à cause de son cation.

> Cas des sulfures :

En présence d'air et d'humidité, les sulfures peuvent s'oxyder et créer soit des sulfates, soit, en milieu acide, de l'hydrogène sulfuré (H_2S) qui, en s'oxydant à son tour, crée de l'acide sulfurique. L'hydrogène sulfuré se dégage aussi de certaines eaux thermales, des eaux d'égout …

3.2.3.3.5 La dégradation des bétons par l'eau de mer

L'eau de mer de pH voisin de 8,2 est un milieu moyennement agressif pour le béton. Elle contient en effets des chlorures, des sulfates…L'attaque est variable selon le degré d'immersion du béton dans l'eau de mer ou son exposition aux embruns :

- **parties de structure en immersion totale :** l'attaque chimique est modérée pour un béton peu poreux et fabriqué avec **un ciment pour travaux à la mer ;**
- **parties de structures en immersion alternée** (dans les zones d'éclaboussures, de marnage et d'aération différentielle [environ 1 m sous les PBE]) : différentes actions physiques se conjuguent aux attaques chimiques pour aggraver les conditions d'exposition :
  - l'érosion par les vagues et le sable,
  - l'absorption et l'évaporation répétée de l'eau,
  - la cristallisation expansive des sels,
  - la fissuration due à la corrosion des armatures ;
- **en zone côtière,** sur plusieurs kilomètres de profondeur (jusqu'à 50 à 60 km) suivant l'importance des vents, les embruns viennent déposer sur les parois des structures des agents agressifs (80 à 160 g/m²/an de sels divers) pouvant provoquer des dégradations des bétons, en particulier, à cause de la corrosion des armatures.

L'attaque est aussi intense **en climat froid**, où le béton est soumis en plus aux cycles gel-dégel, **qu'en climat chaud**, où l'effet thermique accélère la vitesse de dégradation.

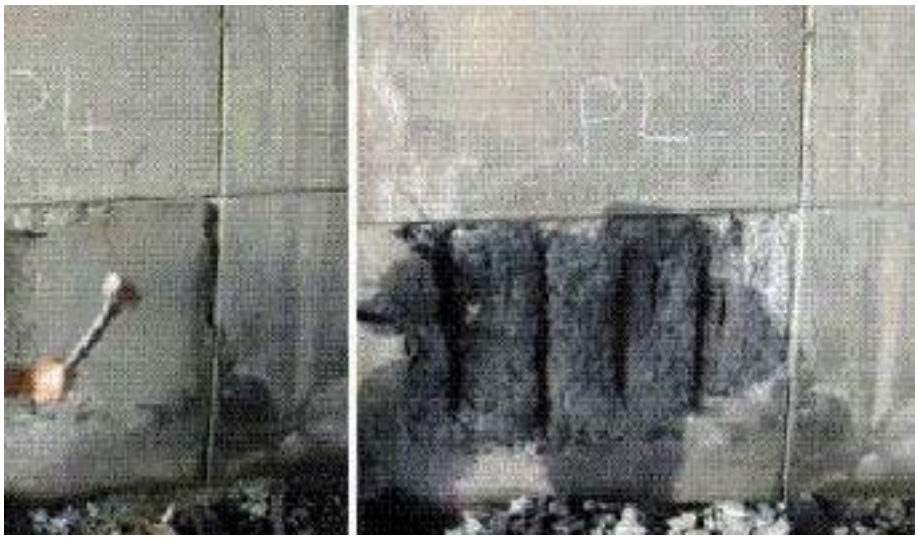


Photo n° 8 : dégradations du béton d'une pile dues à l'eau de mer (crédit photo Freyssinet)

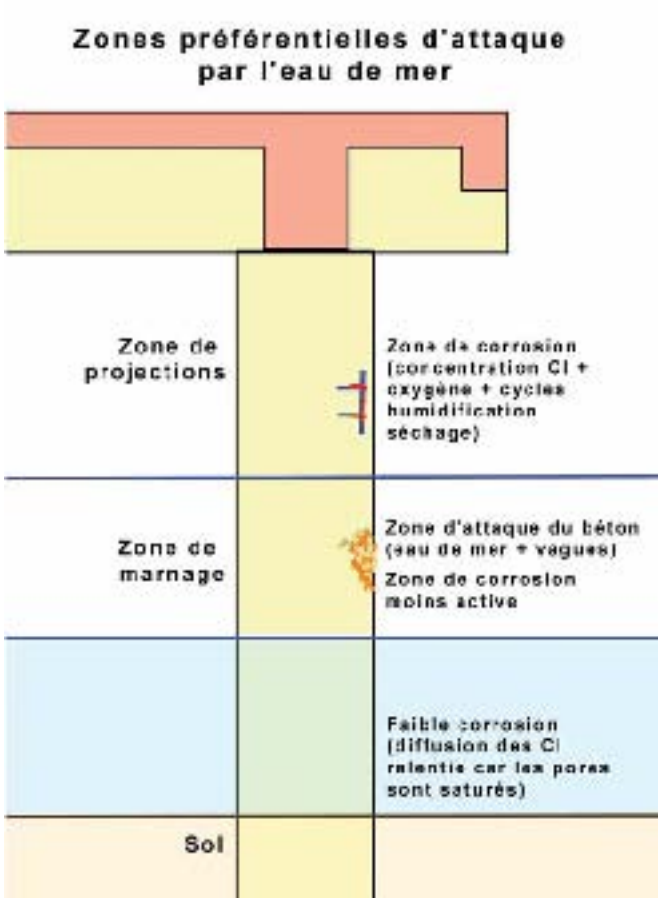


Figure n° 5 : zones préférentielles d'attaque par l'eau de mer d'une structure

3.2.3.3.6 La dégradation des bétons par les actions biochimiques

> Dans ce domaine il faut considérer essentiellement deux cas :

- l'attaque sulfo-bactérienne dans les réseaux d'assainissement, qui met en jeu des micro-organismes du cycle du soufre (thiobacilles) et provoque la formation d'hydrogène sulfuré (H_2S). Celui-ci, en s'oxydant en présence d'humidité, donne de l'acide sulfurique puis des sulfates et donc, in fine, la formation d'ettringite ;
- le vieillissement biologique, qui résulte de l'activité de bactéries, d'algues, de champignons, de lichens ou de mousses.

3.2.3.3.7 La dégradation des bétons due aux réactions de gonflement interne (RGI)

> Comme cela a été évoqué plus haut, deux cas sont à considérer :

- l'alcali-réaction (AR) :
  - les phénomènes complexes connus sous le nom d'alcali-réaction mettent en jeu la formation lente et irréversible en milieu très basique de gels gonflants par réaction entre certaines formes de silice mal cristallisée contenue dans les granulats et les alcalins de la solution interstitielle du ciment hydraté,
  - les ions alcalins proviennent essentiellement du ciment mais aussi des granulats (notamment les granites), des adjuvants, de l'eau de gâchage. Ils peuvent aussi être apportés par l'eau de mer ou les sels de déverglaçage,
  - cette réaction ne peut se développer qu'en présence d'eau (l'eau extérieure mais aussi l'eau interne au béton). La chaleur accélère la vitesse de la réaction ;
- La réaction sulfatique interne (RSI) :
  - la réaction sulfatique interne résulte d'une remobilisation des sulfates initialement contenus dans la matrice cimentaire qui, normalement, se transforment en ettringite primaire lors de la prise du béton. Si cette réaction ne peut avoir lieu, l'ettringite secondaire expansive qui peut se former ultérieurement dans le béton durci provoque sa désorganisation ;
  - cette remobilisation des sulfates nécessite une élévation de température notable et durable du béton pendant sa prise du béton (par exemple, > 75°C pendant plus de 4 heures) ; plusieurs autres facteurs ont un rôle : la nature du ciment et son dosage, la teneur en aluminate tricalcique (C3A), la teneur en alcalins du béton… ;
  - ce phénomène concerne donc les pièces traitées thermiquement et les pièces massives ;
  - la réaction réclame de l'eau et plus spécialement un environnement chaud et humide.

Se reporter **au guide méthodologique de 2003 du LCPC** d'aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne.

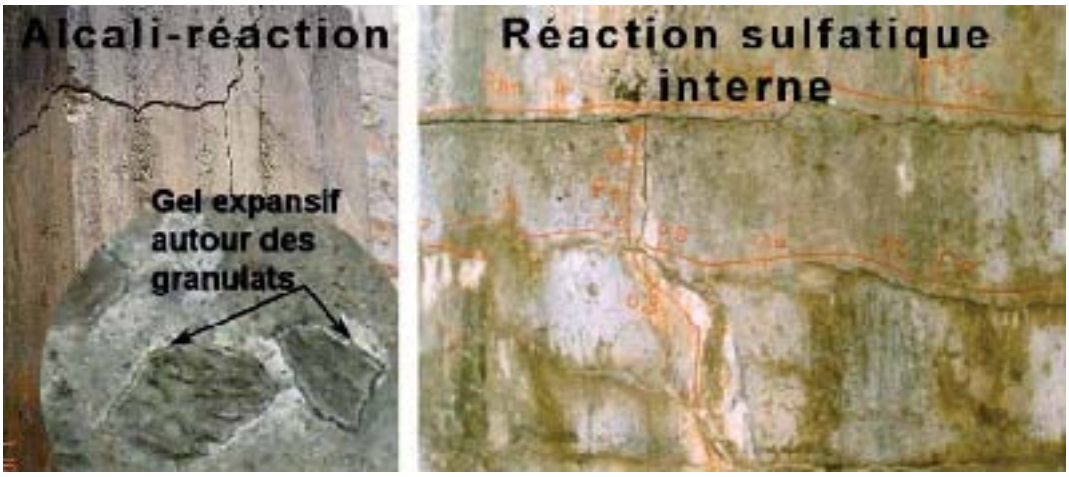


Photo n° 9 : exemples d'alcali-réaction et d'attaque sulfatique interne (crédit photo D. Poineau et LCPC)

Il y a lieu de rappeler que la réparation des structures atteintes par les RGI est très coûteuse et que les résultats espérés ne sont pas toujours atteints. Il est donc conseillé d'appliquer lors de la construction d'un ouvrage **les diverses recommandations** relatives à la prévention des RGI :

- **recommandations de 1994 du MEL** relatives à l'alcali-réaction ;
- **guide technique de 2007 du LCPC** pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne [formation différée d'ettringite]).

Photo n° 10 : guide du LCPC de 2003 (crédit photo LCPC)

Photo n° 11 : guide du LCPC de 2007 (crédit photo LCPC)

3.2.3.3.8 La dégradation des bétons due à la corrosion des armatures

> Pour de plus amples informations sur les mécanismes de la corrosion..., il est loisible de consulter les documents scientifiques et techniques de l'AFGC suivants :

- **guide de novembre 2003** relatif à la maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction ;
- **guide de juillet 2004** relatif à une conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages.

Les dégradations des bétons d'une structure entraînées par la corrosion des armatures peuvent se superposer aux dégradations d'origine physique et/ou chimique, voire mécanique. À terme, la corrosion entraîne la ruine de tout ou partie de la structure, comme le montre une photo ci-après.

3.2.3.3.8.1 Généralités

La durabilité des armatures du béton armé est assurée par leur enrobage de béton sain, c'est-à-dire contenant encore une réserve en ciment susceptible de libérer la chaux nécessaire au maintien du milieu basique (pH ≈ 12 à 13). Dès que cette condition n'est plus remplie, l'acier peut se corroder en formant une rouille gonflante qui est capable de faire éclater le béton. La corrosion des armatures se développe dans les trois cas suivants :

- par suite de la carbonatation atmosphérique du béton (formation de calcite par réaction du dioxyde de carbone - ou gaz carbonique - de l'air avec la chaux disponible du béton) qui perd ainsi ses capacités protectrices ;
- par action de courants de fuite susceptibles d'apparaître dans une structure (corrosion galvanique) ;
- par action de contaminants corrosifs :

- introduits au cours du malaxage des composants (par exemple, le chlorure de sodium en cas d'utilisation d'eau de mer pour le malaxage du béton ou le chlorure de calcium utilisé comme antigel lors de la fabrication du béton...),
- mélangés accidentellement à un composant du béton (par exemple, au cours du transport d'un ciment dans une citerne ayant contenu du chlorure de calcium ou de sodium...),
- provenant de l'environnement extérieur (chlorure de sodium ou autres contaminants).

Photo n° 12 : manifestations visuelles de la corrosion (crédit photo D. Poineau)

3.2.3.3.8.2 Processus de corrosion des armatures

Il est important de bien comprendre **le processus qui conduit à la corrosion électrochimique des armatures.** Il dépend de l'agent agressif mais, également, de l'importance de la fissuration du béton.

Les diagrammes théoriques de corrosion (équilibres potentiel - pH) ont été établis par **Pourbaix** pour **une température de 25°C** et pour **la pression atmosphérique normale : la température comme la pression agissent sur l'importance et la vitesse de la corrosion.**

Ces graphiques indiquent **les domaines où une réaction peut se produire**, ceux où **il y a immunité** (pas de réaction possible) et ceux où **il y a passivation** (la réaction peut se produire dans certaines conditions). Lorsqu'une réaction peut avoir lieu, le diagramme de Pourbaix ne donne aucune indication **sur la réalité de la corrosion ni sur sa vitesse.**

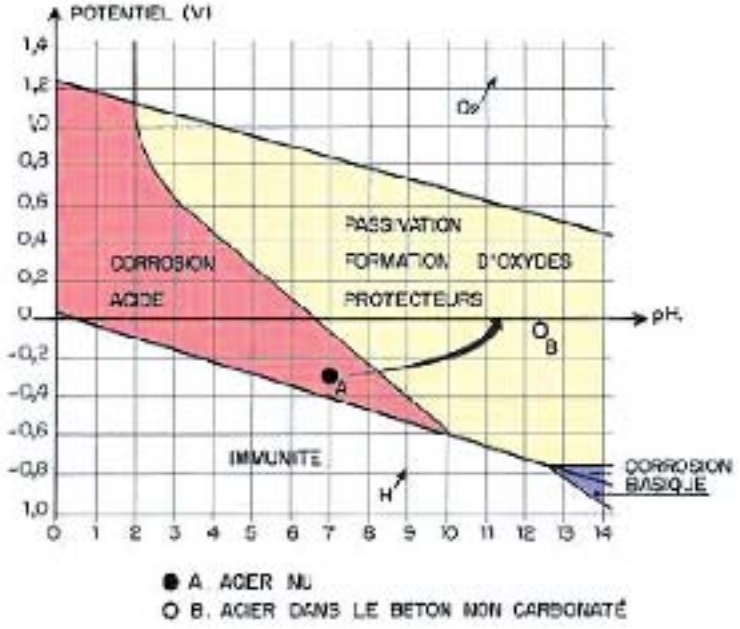


Figure n° 6 : diagramme de Pourbaix (ingénieur belge expert dans le domaine de la corrosion) pour un acier dans l'eau

Le diagramme de Pourbaix[16] ci-devant montre que l'alcalinité du ciment (pH de 12 à 13) rend le milieu passivant (cela concerne le béton comme les coulis d'injection des conduits de précontrainte à base de ciment). Les aciers se trouvent dans une **zone dite de recouvrement ou de passivation** (formation d'oxydes protecteurs) ce qui les **protège de la corrosion.** Lorsque le pH baisse et atteint 9, les aciers passent dans une zone dite de corrosion acide. Les aciers ne sont plus passivés et une corrosion peut se développer.

La corrosion électrochimique combine une action chimique et une action électrique. Elle se développe, soit parce que le métal est immergé dans un liquide, soit parce qu'il se trouve dans une atmosphère humide. Le liquide forme le milieu conducteur ou électrolyte. Il y a création d'une pile entre le métal (pur) qui sert **d'anode** et une impureté, par exemple, la calamine qui sert **de cathode**. Lorsque la pile fonctionne, la réaction (1) suivant se produit :

$$M \rightarrow M^{n+} + n.e^{-} \quad (1)$$

[16] *Diagrammes de Marcel Pourbaix disponibles, par exemple, dans l'Atlas des équilibres électrochimiques paru aux éditions Gauthier-Villards en 1963.*

Les atomes de métal M perdent **des électrons** et deviennent **des ions** qui passent dans la solution. Les électrons libérés **(e-)** restent dans le métal et se dirigent vers la cathode. **Cette première réaction est dite «anodique ou d'oxydation».**

Le système métal-électrolyte devant rester en équilibre, d'autres réactions doivent se développer à la même vitesse **pour consommer les électrons libérés. Ces réactions (2a ou 2b) sont dites «cathodiques ou de réduction» :**

$$H+ + e^- \rightarrow 1/2H_2 \ (2a)$$

La réaction **2a** qui se produit en milieu acide en l'absence d'oxygène conduit à un dégagement d'hydrogène pouvant être naissant, ce qui favorise la corrosion fissurante sous tension des armatures de précontrainte, qui peuvent être sensibles à cette forme de corrosion.

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- \ (2b)$$

En milieu non acide, les produits des réactions **(1)** et **(2b)** qui sont dans l'électrolyte se combinent entre eux pour former un hydroxyde. Cet hydroxyde précipite sur le métal pour former une couche plus ou moins imperméable. Si cette couche est imperméable, elle bloque les diverses réactions. Cette réaction (3) est dite de recouvrement (anciennement dite **de passivation**). On utilise **les termes de polarisation anodique ou cathodique** suivant que le dépôt, qui bloque la réaction, se forme sur l'anode ou la cathode. Ultérieurement, si la couche passivante est détruite, en particulier, lorsque le pH diminue, la corrosion peut alors se développer.

Photo n° 13 : exemple de corrosion avec polarisation cathodique (crédit photo Freyssinet)

> Effets de la carbonatation du béton :

La carbonatation fait progressivement tomber **le pH à 9.** Les armatures se dépassivent et, s'il y a présence d'humidité et d'oxygène, la corrosion peut démarrer. Dans un milieu sec comme l'intérieur d'un bâtiment, la carbonatation peut être très importante, mais la corrosion inexistante.

> Effets des chlorures :

Si la concentration en ions chlorure, au contact des armatures, dépasse **les seuils suivants** (seuils admis par la communauté scientifique), il y a chute brutale du pH et la corrosion des armatures se développe :

- au moins 0,4% du poids du ciment de la formule du béton ;
- au moins de 0,04 à 0, 1% du poids du béton suivant son dosage en ciment.

Remarque : *Ces valeurs ne doivent pas être confondues avec celles fixées dans* ***le fascicule 65A du CCTG*** *qui correspondent à une limitation des chlorures dans le béton d'un ouvrage à construire !*

On notera aussi que lorsque **la teneur en chlorures est très élevée dans un béton** (ouvrage à la mer), il peut se produire une dissolution des armatures sans gonflement apparent (formation de rouille dite «verte»). Cette corrosion, par l'absence de toute manifestation visuelle, bien que rare, est redoutable

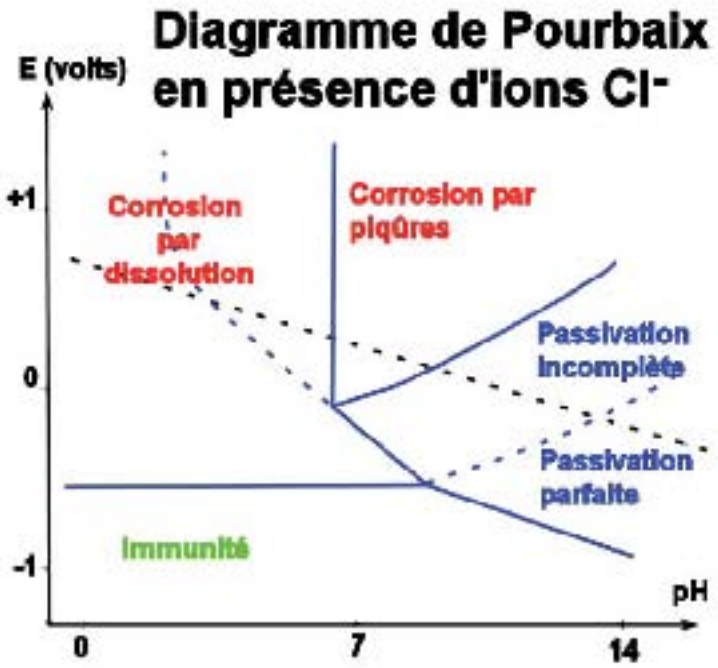


Figure n° 7 : diagramme de Pourbaix en présence de chlorures

Nota : *d'autres contaminants (iode, brome, fluor…) peuvent aussi provoquer la corrosion des armatures.*

> Les mécanismes de pénétration des agents agressifs dans le béton (le gaz carbonique et les chlorures) :

Les agents agressifs contenus dans l'air, l'eau ou le sol pénètrent dans le béton par les pores et les fissures :

- sous l'action de la pression du gaz ou du liquide (loi de Darcy) ;
- par diffusivité, c'est-à-dire sous l'effet d'un gradient de concentration (lois de Fick) :
  - l'eau contenue dans une atmosphère humide tend à pénétrer dans un béton desséché,
  - la solution interstitielle du béton d'une zone tend à avoir la même composition que celle de la zone voisine.

Si l'on arrive à quasiment bloquer la pénétration des agents agressifs en réduisant très fortement la perméabilité du béton, par exemple, par un revêtement de protection :

- la pénétration du gaz carbonique sera très faible et le front de carbonatation ne continuera sa progression que très lentement vers l'intérieur du béton ;
- cependant les chlorures présents dans la peau du béton, vont continuer à pénétrer par diffusivité dans la masse du béton de façon, qu'à terme, leur dosage soit uniforme. S'ils sont en quantité suffisante, leur dosage au droit des armatures pourra donc atteindre la valeur critique et engendrer une corrosion.

En conclusion, en présence de chlorures il faut mesurer à la fois leur **profondeur de pénétration** mais aussi **leur répartition en quantités**, de façon à pouvoir calculer, à terme, le dosage qu'ils atteindront au droit des armatures. ***ATTENTION,*** si ce dosage risque de dépasser le seuil critique, la technique de réparation choisie devra pouvoir éliminer le surplus de chlorures !

> En béton armé non fissuré, la corrosion se développe en deux étapes :

- la première, d'une durée «t_0», est la **période dite «d'incubation»** (phase dormante) pendant laquelle les agents agressifs pénètrent dans le béton d'enrobage et finissent par arriver au contact des armatures ;
- ensuite, dès que le pH tombe à 9 et si le milieu est humide et aéré, la corrosion se développe, ce qui marque **le début de la période dite de propagation ;**
- l'expansion de la rouille (jusqu'à près de 800%), qui se développe, provoque dans un premier temps la fissuration du béton d'enrobage puis sa fracturation ;
- ensuite, le béton éclate, les morceaux tombent au sol (il y a danger pour les usagers et les tiers) ;
- enfin, il y a disparition des armatures et à terme effondrement de tout ou partie de la structure.

Photo n° 14 : exemple de désordres extrêmes dus à la corrosion (crédit photo D. Poineau)

Actuellement, le milieu du génie civil considère que la durée de la période dormante d'incubation correspond à «la durée de vie de la structure». En effet, au-delà de cette période, l'état de l'ouvrage se détériore.

Cette «fin de vie» ne doit pas être confondue avec celle qui correspond à l'effondrement de tout ou partie de la structure, qui se produit bien plus tard[17].

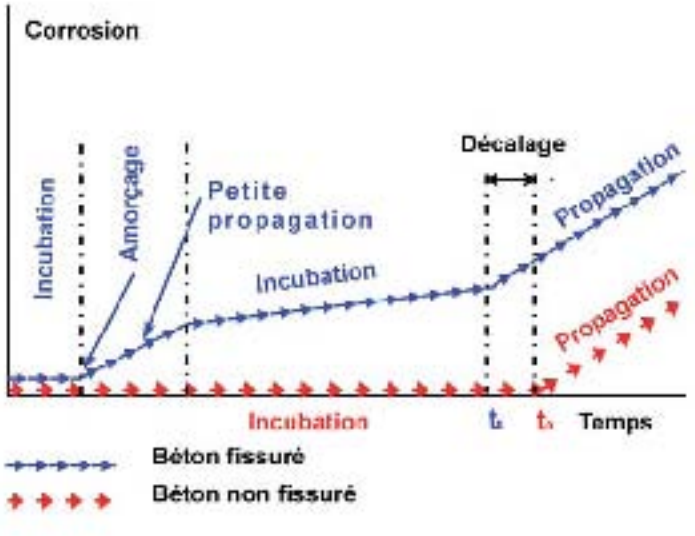


Figure n° 8 : le développement de la corrosion des armatures : cas du béton fissuré et cas du béton non fissuré

[17] Consulter l'article de R. François, G. Arligue et J. C. Maso sur la durabilité du béton soumis à l'action des chlorures dans le Cahier de l'AFGC n° 310 de décembre 1994 (Annales de l'ITBTP n°529 de décembre 1994 dans la série béton n°316).

> En béton armé fissuré :

Après **une petite phase d'incubation,** la corrosion apparaît tout d'abord sous forme **de piqûres** à la surface des armatures, le plus souvent dans les fissures qui se développent **au droit des armatures transversales** (les chlorures jouent ici le rôle principal). Il y a donc une **amorce de corrosion :**

- si les fissures ont un souffle négligeable et sont relativement fines (< 0,4 mm d'après les études), les résidus de la corrosion peuvent boucher les fissures, ce qui bloque la réaction;
- la carbonatation et les chlorures continuent cependant à pénétrer dans le béton de couverture des aciers de BA et à se rapprocher des lits d'armatures ;
- on retrouve, comme dans le cas précédent, **la période d'incubation.** Puis, dès que le pH descend à 9, la corrosion démarre comme précédemment. En conclusion, dans le cas du béton fissuré, **la durée de la phase dormante «t_0» est légèrement plus courte** que dans le cas du béton non fissuré.

Si les fissures laissent passer l'eau, les produits de corrosion ne peuvent pas se déposer. Dans un tel cas, la corrosion peut être beaucoup plus rapide et peut même provoquer une rupture partielle ou totale de l'élément, car la corrosion est concentrée au droit de la fissure.

Si les fissures sont actives, la corrosion se développera également plus rapidement. Les résultats de recherches sur ce sujet sont peu nombreux.

Si l'ouverture des fissures dépasse 0,5 mm, c'est la porte ouverte à la pénétration des produits agressifs, surtout si les fissures sont traversantes et au contact de l'eau ou de l'humidité.

Les fissures peuvent aussi marquer, si elles atteignent et dépassent nettement le millimètre, un début de plastification des armatures.

Il faut remarquer que **des fissures largement ouvertes** ne sont pas toujours le résultat d'une insuffisance de force portante. Cependant, elles mettent en jeu la durabilité de la structure en favorisant la corrosion des armatures, voire la destruction du béton à cœur. Dans tous les cas, de telles fissures relèvent de la pathologie.

À titre d'exemple, l'absence d'armatures de peau dans les âmes de poutres de grande hauteur peut conduire, sous les effets des retraits gênés, à des fissures de plusieurs millimètres d'ouverture. Ces fissures n'entraînent pas forcément une réduction importante de la résistance mécanique de la structure, cependant, elles facilitent la pénétration des agents agressifs (la photo suivant montre une fissure traversant et de 4 mm d'ouverture en surface constatée sur l'âme d'une poutre du pont de Saint-Romains-des-Îles sur la Saône).

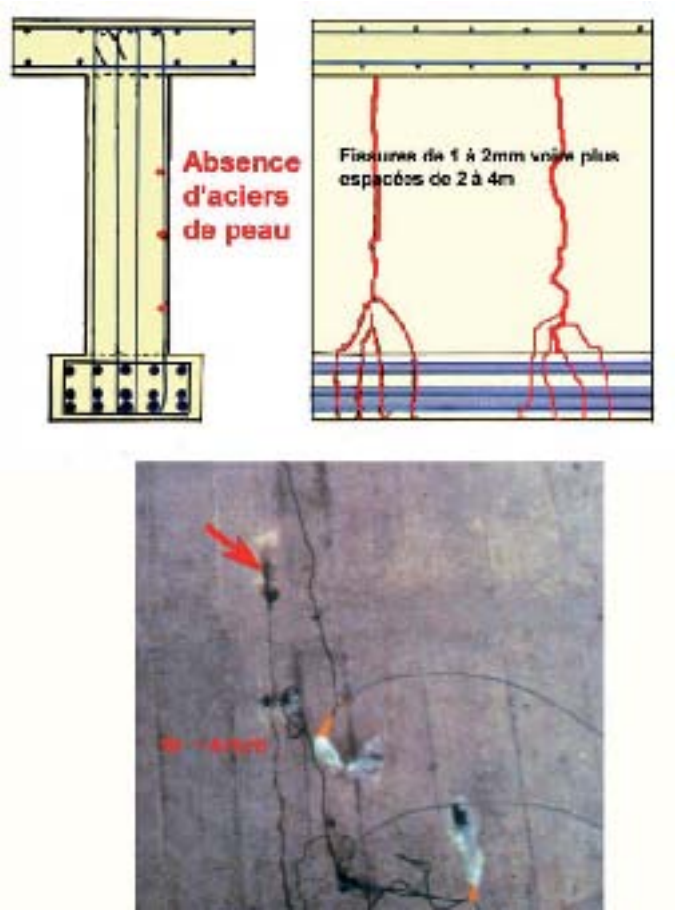


Photo n° 15 : fissure de retraits gênés (crédit photo D. Poineau)

S'il est logique que **l'ouverture des fissures** soit fonction de l'intensité du chargement appliqué, elle est aussi fonction de **l'épaisseur de l'enrobage** des armatures. Pour deux poutres à ferraillage et chargement identiques et dans les mêmes conditions d'environnement :

- **l'ouverture des fissures de la poutre ayant le plus fort enrobage** sera plus importante que l'ouverture des fissures de l'autre poutre ;
- **mais la durée d'incubation** de la poutre ayant le plus fort enrobage sera plus longue que la durée d'incubation de l'autre poutre.

ATTENTION, le plus souvent, une structure présente :

- des insuffisances d'enrobage de ses armatures localisées dans certaines zones,
- un béton dont les caractéristiques ne sont pas uniformes (par exemple, en matière de perméabilité et/ou de porosité) ;
- des parties plus ou moins exposées à l'environnement agressif et aux polluants (par exemple, sur les parties quasiment horizontales, l'humidité favorise le développement de micro-organismes générateurs d'attaques acides…)…

Par voie de conséquence, le développement de la corrosion n'est pas uniforme dans la structure. Le long d'une armature, certaines parties jouent **le rôle d'anode vouée à la dissolution** et d'autres, le rôle **de cathode.** Les désordres apparaissent dans les zones anodiques (fissurations, délaminations… comme le montre la photo ci-après).

ATTENTION, en réparation classique par purge et ragréage, lorsque seules sont traitées les parties présentant des désordres, le pH de la zone réparée, de nouveau élevé, protège l'armature mais, dans les deux parties adjacentes, le pH du béton peut être beaucoup plus faible. **Il peut alors se développer une nouvelle pile de corrosion** où l'ancienne anode devient cathode et inversement (inversion de polarité). Quelques années après la réparation, apparaissent de nouveaux désordres (la réactivité de la pile est encore plus importante s'il y a encore des traces de corrosion juste à l'interface entre la partie réparée et les parties restées en état). **Une telle réparation n'est donc pas forcément pérenne ! La suite du guide précise les dispositions à prendre pour limiter une réapparition trop rapide des phénomènes de corrosion.**

Photo n° 16 : fissure avec passage d'eau, conséquences de la corrosion localisée ainsi induite (crédit photo DDE54)

3.2.3.4 Causes mécaniques de dégradation des bétons

De nombreuses actions peuvent entraîner des **désordres mécaniques** dans une structure en béton armé ou précontraint en service, voire pendant sa construction avec apparition de fissures, fractures, épaufrures, ruptures partielles ou totales d'éléments, ou de la totalité de la construction.

Certaines des causes de désordres sont **accidentelles** (un ouvrage doit normalement avoir été conçu pour résister aux actions accidentelles prévisibles), d'autres sont dues **à l'obsolescence de la structure** (capacité portante devenue insuffisante à cause du vieillissement de ses matériaux ou de l'augmentation des charges d'exploitation) ou ont pour origine **des défauts ou des erreurs de conception ou d'exécution** (facteurs aggravants développés dans le paragraphe 3.2.3.5 ci-après). La liste suivante, non limitative, donne les cas les plus courants :

- les chocs (poids lourds, bateaux, véhicules pour le cas des ouvrages d'art, voire de certains bâtiments, chute de masses diverses tels que des rochers pour les bâtiments) ;
- les effets de phénomènes naturels tels que les crues, le vent, les séismes, les raz-de-marée;
- les explosions ;

- les tassements de fondations dus à la qualité du sol, à des affouillements, à des travaux sur l'ouvrage ou à proximité… ;
- les déformations excessives et les variations dimensionnelles (causes courantes de désordres dans les bâtiments) ;
- les blocages anormaux de structures qui, normalement, auraient dues être libres de se déplacer ;
- les excès de charges permanentes ou de charges d'exploitation…

Photo n° 17 : conséquences d'un choc sur le tablier d'un pont (crédit photo du CÉTÉ de Lyon)

3.2.3.5 Facteurs aggravants : l'influence des défauts de conception et d'exécution et/ou des erreurs de gestion sur les dégradations du béton

Les défauts de conception et d'exécution sont la cause de nombreux dommages. Leurs origines sont diverses :

> Au stade de la conception :

- la tendance de certains projeteurs à faire travailler le béton au maximum de ses possibilités conduit à des structures étriquées qui s'avèrent difficiles à réaliser sans défaut et qui sont donc plus sensibles au vieillissement,

- la non prise en compte de **«l'effet d'échelle»** par le projeteur, c'est-à-dire, lorsque la conception de la structure sort du domaine d'emploi visé par les règles de calcul (géométrie inhabituelle, matériaux nouveaux, armatures de précontrainte de très forte puissance, phénomènes, habituellement négligeables, mais devenant importants…),
- une modélisation de structure inadaptée pouvant conduire à sous-estimer l'importance des sollicitations (par exemple, dans les calculs aux éléments finis),
- la non-prise en compte des tolérances d'exécution dans le calcul des sollicitations,
- etc.

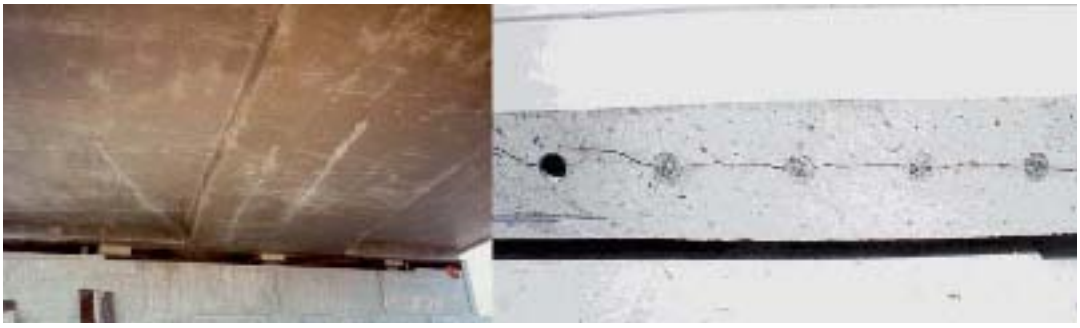


Photo n° 18 : effets des efforts concentrés sous les ancrages en l'absence de vérification des contraintes dans le béton (crédit photo D. Poineau)

> Au stade de la réalisation :

Photo n° 19 : rupture par corrosion d'une armature de précontrainte par défaut d'injection (crédit photo D. Poineau)

- la mauvaise conception ou réalisation du ferraillage, se traduisant, par exemple, par des entassements d'armatures et donc des difficultés de mise en œuvre du béton, des recouvrements de barres situés tous dans la même section et très souvent des insuffisances d'enrobage,
- la mauvaise formulation du béton, qui engendre une porosité et une perméabilité trop élevée facilitant ainsi la pénétration des agents agressifs,
- la mise en œuvre de matériaux, dont les caractéristiques mécaniques diffèrent de celles prise en compte dans la note de calculs (par exemple, pour un béton un coefficient de fluage nettement supérieur à la normale),
- la mauvaise réalisation des coffrages, qui entraîne des fuites de laitance (nids de cailloux), des déplacements des armatures (insuffisances d'enrobage), des hors-profils et divers autres défauts ou des blocages s'opposant aux premiers retraits,
- les mauvaises conditions de transport du béton frais, en particulier par temps chaud, qui favorise, notamment, la ségrégation et le raidissement précoce,
- la mauvaise mise en œuvre du béton, qui peut provoquer des défauts d'homogénéité, une ségrégation et des défauts de bétonnage,
- le décoffrage sans précaution et/ou mauvaise manutention d'éléments de béton, qui peut entraîner des épaufrures, des fissures et des ruptures,
- la mauvaise réalisation de la couche d'étanchéité, qui favorise la pénétration des agents agressifs puis l'apparition d'efflorescences, de stalactites et enfin la corrosion des armatures,
- etc.

> Au stade de la gestion :

- l'absence de surveillance et d'entretien, en particulier de tous les éléments qui permettent de maîtriser l'action des eaux sur les structures (chape d'étanchéité, systèmes de drainage…),
- l'augmentation des charges permanentes (par exemple, sur un pont, le rechargement de la couche de roulement sans un rabotage préalable),
- les charges d'exploitation qui augmentent et deviennent de réelles surcharges,
- etc.

Photo n° 20 : conséquences d'un défaut de conception et d'entretien des dispositifs d'évacuation des eaux et de l'étanchéité (crédit photo D. Poineau)

3.2.4 LES TYPES DE PATHOLOGIES ET LES OBJECTIFS SPÉCIFIQUES DE LA RÉPARATION

3.2.4.1 Généralités

Il convient de bien distinguer **deux types de pathologies :** soit il s'agit **d'un problème de matériau,** soit **d'un problème de fonctionnement de la structure.** La réalité fait que ces deux problèmes sont le plus souvent concomitants, mais les deux aspects doivent être examinés séparément, en complémentarité. Par ailleurs, il faut noter que le matériau béton ne se comporte pas de la même manière selon qu'il est non-armé (ou très faiblement) ou armé (avec ou sans précontrainte).

En conséquence, les quatre cas qui suivent sont à examiner successivement. En effet, par exemple, une construction en béton précontraint peut présenter à la fois des désordres affectant ses matériaux (le béton, les armatures passives et les armatures actives) et la structure (fissures et déformations causées par un défaut de capacité portante dû à la rupture d'armatures de béton armé ou de précontrainte par les effets de la corrosion ou ceux d'un choc accidentel…).

> Les quatre cas portent sur :

1. le matériau béton ;
2. le matériau béton armé ;
3. le matériau béton précontraint ;
4. les défauts de fonctionnement des structures en béton armé et/ou précontraint.

3.2.4.2 Le matériau béton

> Le béton peut présenter différents défauts :

- des défauts de surface, qui concernent les parements tels que le ressuage, le bullage, des balèvres, des traces de laitance, des taches… ;
- des défauts qui peuvent même atteindre le cœur de la pièce en béton, tels que des nids de cailloux, des vides ;
- un manque de compacité, une forte porosité et une forte perméabilité…

Ces défauts ont pour origine la formulation du béton, des coffrages de mauvaise qualité, le peu de soin apporté à la mise en œuvre du béton…

> Le béton peut aussi présenter des défauts caractéristiques d'une désorganisation de ses constituants due à :

- des phénomènes physico-mécaniques tels que les cycles gel-dégel, les effets d'un incendie, ceux d'un choc… ;
- des phénomènes physico-chimiques tels que les actions des sulfates, des chlorures…

> L'objectif de la réparation consiste alors, le plus souvent, à essayer de redonner au matériau les caractéristiques qu'il aurait dû avoir à l'origine. La réparation a pour but :

- d'endiguer la maladie en faisant barrage aux agents responsables du mécanisme de dégradation (un revêtement d'étanchéité, par exemple) ;
- de consolider le béton par un traitement interne (une injection, par exemple) ;
- d'éliminer le béton dégradé (purge) pour le remplacer par un matériau adéquat qui devra à la fois jouer un rôle de protection et de reconstitution de l'esthétique ;
- de reconstituer le monolithisme de la structure qui présente des caractéristiques mécaniques minimales (par précontrainte, par exemple) ;
- d'ajouter du béton pour augmenter la capacité portante…

3.2.4.3 Le matériau béton armé

Lorsque le béton est non-armé ou très faiblement armé, si une fissure se produit (par exemple, sous les effets combinés des différents retraits), rien ne s'oppose à son extension. L'ouverture de la fissure, du moins en surface, peut atteindre plusieurs millimètres. Il y a donc peu de fissures mais elles sont largement ouvertes.

Au contraire, dans **un béton armé** qui satisfait **aux conditions de non-fragilité,** il y a un grand nombre de fissures mais elles sont très faiblement ouvertes (quelques dixièmes de millimètres). Bien entendu ce comportement exige que la pièce ait été correctement dimensionnée et exécutée et qu'elle ne subisse pas l'effet d'actions qui n'auraient pas été prises en compte lors de sa conception.

Outre les désordres pouvant affecter le matériau béton (se reporter à l'article 3.2.4.2), voire la structure porteuse (se reporter à l'article 3.2.4.5), le béton armé se dégrade généralement à la suite de **la corrosion de ses armatures** (se reporter à l'article 3.2.3.3.8.2). Dès que la couche de béton d'enrobage n'assure plus la protection des armatures (effets de la carbonatation, des chlorures…) les aciers peuvent se corroder sous l'action de l'humidité et de l'oxygène. La rouille produite gonfle, ce qui provoque la fissuration du béton d'enrobage puis son éclatement…

Photo n° 21 : défaut d'enrobage, cause de la corrosion des armatures (crédit photo LRPC de Strasbourg)

La réparation vise alors à ralentir ou à stopper la corrosion et à redonner une protection aux aciers. On peut être amené, dans des cas où les armatures sont fortement corrodées, soit à les remplacer, soit à en ajouter.

Nota : *il est possible, avec certaines précautions, de compléter ou de remplacer les armatures en acier par des armatures en acier inoxydable (se reporter à l'article 3.3.3.9 ci-après).*

3.2.4.4 Le matériau béton précontraint

Outre les désordres pouvant affecter le matériau béton (se reporter à l'article 3.2.4.2), les armatures passives (se reporter à l'article 3.2.4.3), voire la structure porteuse (se reporter à l'article 3.2.4.5), le béton précontraint peut subir les conséquences **de la corrosion de ses armatures actives,** c'est-à-dire une réduction de sa capacité portante qui peut aller dans les cas extrêmes jusqu'à l'effondrement de la structure.

Les armatures de précontrainte peuvent, en effet, subir deux types de corrosions : **une corrosion classique dite par dissolution** qui progressivement, réduit la section résistante des armatures et **une corrosion dite «fissurante sous tension».**

> La susceptibilité à la corrosion sous tension peut être due :

- à la composition de l'acier (par exemple, une teneur élevée en cuivre) ;
- au processus de fabrication (par exemple, les armatures laminées [il s'agit de productions anciennes] sont plus susceptibles que les armatures tréfilées) ;
- au processus de trempe (par exemple, les armatures trempées à l'huile sont plus susceptibles que les armatures trempées au plomb)…

De plus, toute armature de précontrainte (même si elle est peu susceptible vis-à-vis de la corrosion fissurante sous tension), soumise à **un contact permanent avec de l'eau** (par exemple, l'eau fossile issue de décantation du coulis d'injection et ce malgré son pH élevé de l'ordre de 12) peut subir une corrosion fissurante sous tension et se rompre brutalement.

Photo n° 22 : corrosion par dissolution d'armatures de précontrainte (crédit photo LRPC de Strasbourg)

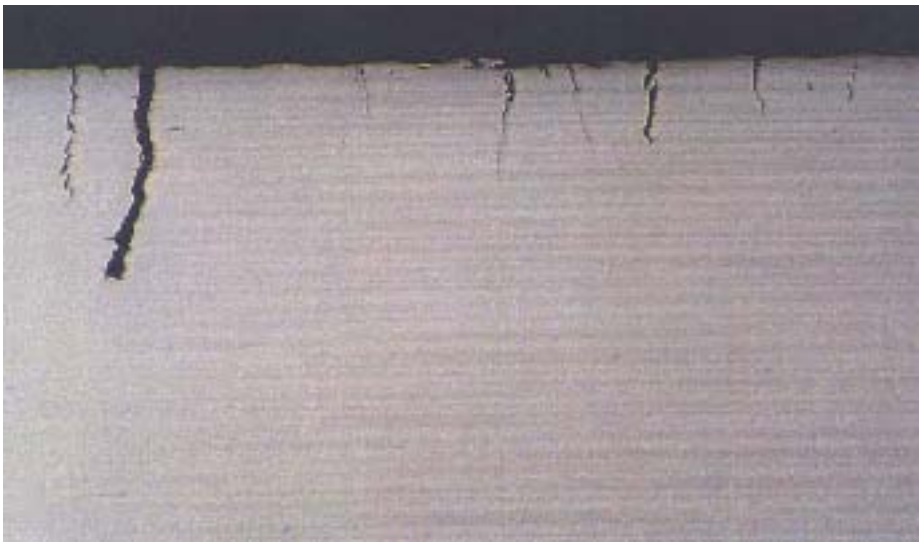


Photo n° 23 : fissures de corrosion fissurante sous tension sur un fil d'un toron (crédit photo LREP)

Dans le cas de **la précontrainte par pré-tension,** les causes de la corrosion sont analogues à celles qui provoquent la corrosion des armatures de béton armé (carbonatation du béton, pénétration des chlorures…).

Dans le cas de **la précontrainte par post-tension,** lorsque l'injection des conduits a été réalisée à l'aide d'un coulis à base de ciment, il faut distinguer **la précontrainte intérieure au béton et la précontrainte extérieure au béton :**

> en précontrainte intérieure au béton, la corrosion peut être due :

- à la présence d'agents agressifs dans les conduits :
  - soit sous forme d'eau fossile ; cette eau peut provenir, soit d'une chasse incomplète des eaux de lavage des conduits (opération interdite depuis les années 2000), soit d'une mauvaise purge de l'extrémité du conduit d'où sort le coulis…,
  - soit sous forme d'une pâte blanchâtre et humide ; cette pâte provient d'une décantation du coulis après l'injection due à une incompatibilité de ses constituants (ciment et adjuvants)…,
- à la pénétration d'agents agressifs dans les conduits plus ou moins bien injectés :
  - soit par les ancrages (par exemple, mauvais remplissage des encoches des câbles relevés combiné avec des cachetages non étanches et une chape d'étanchéité défectueuse, …),
  - soit par la surface du béton, en partie courante, à cause de la présence de vides ou de nids de cailloux…

Photo n° 24 : défaut de bétonnage sous le talon d'une poutre préfabriquée (crédit photo LRPC de Strasbourg)

> en précontrainte extérieure au béton, les conduits étant étanches à l'eau, la pénétration d'agents agressifs extérieurs aux conduits est très rare, sauf si le conduit est endommagé. La corrosion des armatures est due à la présence de la pâte blanchâtre humide issue de la décantation du coulis due à une incompatibilité entre le ciment et les adjuvants. Il est rappelé que ce phénomène peut aussi se produire dans les conduits intérieurs au béton.

Photo n° 25 : le fouettement du câble est la conséquence de la rupture par corrosion d'une armature de précontrainte extérieure (crédit photo D. Poineau)

> Les objectifs de la réparation en cas de corrosion des armatures de précontrainte, sont de deux ordres :

- stopper la corrosion en cours en faisant barrage à l'eau (par exemple, réinjections des conduits de précontrainte par un coulis à base de ciment et sous vide, réfection des cachetages, remplacement de la chape d'étanchéité)[18];
- redonner à la structure la force de précontrainte nécessaire par ajout de câbles extérieurs au béton.

Il faut noter que seule la corrosion par dissolution est susceptible d'être stoppée par la réinjection du conduit par un coulis à base de ciment.

Pour conclure, la réparation d'une structure précontrainte en cas de corrosion de ses armatures est très complexe et **sort des limites du présent guide.** Il faut se reporter au **GUIDE N°8 [FABEM].**

3.2.4.5 Les défauts de fonctionnement des structures en béton armé et/ou précontraint

Ils se manifestent généralement par l'apparition de fissures d'ouverture excessive au niveau du béton. Des déformations excessives peuvent aussi se produire. En cas de chocs, le béton peut subir des fissurations et des éclatements…

Photo n° 26 : fissuration d'une poutre en béton précontraint (crédit photo LRPC d'Aix-en-Provence)

[18] À noter le procédé ATEAV-PMD basé sur l'injection d'inhibiteurs de corrosion (nitrite de calcium) par une pompe à ultrasons (consulter les présentations du procédé sur le site Le-Pont).

Dès que les symptômes d'un défaut de fonctionnement sont repérés, **un pré-diagnostic** doit être effectué (expertise rapide), d'une part pour savoir s'il est nécessaire de mettre **la structure en sécurité** (limitation des charges, mise en place d'un étaiement, fermeture au trafic…), d'autre part pour définir les investigations à effectuer par le bureau d'études et le laboratoire afin d'aboutir **au véritable diagnostic** (causes et importance des désordres). Tous ces points sont développés dans l'article qui suit.

> Lorsque le défaut de fonctionnement et ses causes sont identifiés, les objectifs de la réparation sont :

- de stabiliser ou d'annuler le phénomène générateur ;
- de redonner au matériau béton sa continuité mécanique ;
- de redonner à la structure sa force portante.

En conclusion, il ne faut jamais oublier que, réparer, c'est d'abord s'attaquer aux causes des désordres, ensuite y porter remède et enfin seulement mettre en œuvre des méthodes de réparation avec des produits judicieusement choisis. Cela renforce **l'importance d'un bon diagnostic** avant toute réparation.

3.2.5 LE DIAGNOSTIC ET L'EXPERTISE PRÉALABLE

Pour définir **les objectifs du diagnostic,** il est possible de reprendre les termes utilisés dans le document technique de **l'AFGC** sur la réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion (guide de novembre 2003), qui s'appliquent à l'ensemble des opérations de réparation que la structure soit en béton armé ou précontraint.

L'annexe B4 (informative) de la norme **XP ENV 1504-9** développe une démarche semblable, qui vise cependant un domaine plus important, allant de la gestion de l'ouvrage à la réception des réparations et prenant en compte des diverses origines des désordres (physiques, chimiques…).

Pour établir ce diagnostic, il est possible de se référer à **des documents de référence** (guides des défauts, guides techniques sur l'auscultation, guides sur les méthodes de recalcul…) ou à **des sites de référence** dont la liste est donnée **dans l'appendice au présent guide.**

3.2.5.1 Le diagnostic

> Son objectif est de réaliser :

- l'identification de l'origine des désordres ;
- l'évaluation de leur étendue dans l'espace ;
- la prédiction de leur évolution probable, dans l'espace et dans le temps, en l'absence d'intervention ;

- l'estimation des conséquences des désordres **sur la portance et la sécurité de l'ouvrage et des personnes ;**
- la détection **de produits nocifs** éventuellement présents, à cause de leur incidence sur l'exécution de la réparation (par exemple, amiante, plomb…) ;
- la définition des suites à donner et le principe du ou des solutions de réparation envisageables.

Des considérations d'ordre esthétique sont aussi à prendre en compte dans de nombreux cas (par exemple, bâtiments, monuments historiques) du fait de la nature des matériaux de base, de leur texture, de leur couleur et de la nature du ciment…

ATTENTION : *le renforcement d'une structure pour adapter son état de service à de nouveaux besoins nécessite également l'établissement* ***d'un diagnostic,*** *même si la structure est apparemment* ***en bon état. Plus une structure est âgée, plus le diagnostic doit être plus fouillé,*** *en particulier parce qu'une corrosion des armatures peut être amorcée sans désordres apparents.*

3.2.5.2 La procédure à suivre

> Elle découle alors des principes suivants (à adapter selon l'importance de l'ouvrage à réparer) :

- mise en œuvre de **mesures de sauvegarde** immédiates, si nécessaire, (purges, filets de protection, fermeture au trafic…) ;
- réalisation **d'une visite préliminaire** et de certaines opérations connexes (examen du dossier de l'ouvrage…) dans le but d'obtenir un pré-diagnostic ;
- mise au point d'**un programme d'investigation ;**
- lancement des opérations liées au diagnostic.

Photo n° 27 : filets de protection sous un pont en béton armé ancien et désaffecté (crédit photo D. Poineau)

Les différentes procédures à suivre, selon le cas étudié, sont développées dans le **GUIDE GÉNÉRAL ou (GUIDE N°0).** On ne reprend ici que ce qui est spécifique au béton.

> **Le guide de novembre 2003** de l'AFGC : Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion donne, dans son annexe A3, des conseils pour passer **commande d'un diagnostic.**

La réussite de l'opération demande évidemment que la personne chargée des opérations de diagnostic soit **«un expert[19]»** ayant une expérience professionnelle étendue dans le domaine des structures, dans celui des propriétés physico-chimiques des matériaux, dans celui de l'instrumentation des structures et des techniques d'auscultation ainsi que dans le domaine juridique. Bien entendu, dans les cas difficiles, il pourra se faire assister de spécialistes de la mécanique des structures, de l'instrumentation des ouvrages, de la chimie des matériaux…

La mission de l'expert commence par la visite préliminaire, le pré-diagnostic et la rédaction du programme d'investigation et va au minimum jusqu'à la remise du rapport de **diagnostic.** Outre son rôle **de conseil du maître d'ouvrage** l'expert doit assurer **la coordination** des différents intervenants (bureau d'études, laboratoire…).

Enfin cette procédure doit être conclue par la mise en place d'une surveillance spécifique de l'ouvrage après sa réparation, à caractère préventif.

3.2.5.3 La visite préliminaire

Elle a pour objet d'améliorer la compréhension de l'état et du fonctionnement de la structure, de préciser les conditions environnementales, les désordres visibles, l'accessibilité des parties dégradées. Elle débouche sur **un pré-diagnostic** et sur **un programme d'investigations.** Elle comprend aussi bien la collecte d'informations sur la genèse et la vie de l'ouvrage que la prise de photographies et la réalisation de quelques tests simples permettant de détecter : la profondeur de carbonatation, une alcali-réaction, la présence de produits nocifs…

Cette visite doit permettre :

- d'émettre **un pré-diagnostic** sur les causes probables des désordres,
- d'effectuer **la mise au point du programme d'investigations,** si nécessaire, (inspection détaillée, études d'impacts, recherche d'itinéraires de déviation, étude de mise en place d'un ouvrage provisoire, investigations particulières à effectuer [par le laboratoire, le géomètre…], hypothèses du recalcul, types de calculs à effectuer,…) ;
- d'évaluer si la mise en jeu **des responsabilités et garanties** est nécessaire (cas du contentieux),
- de faire évoluer éventuellement **les mesures de sauvegarde** (limitation du trafic, étaiement par exemple),
- d'évaluer **le coût probable et la durée des investigations,** si celles-ci sont raisonnables au vu de **la valeur vénale de l'ouvrage…**

Cette visite doit être effectuée par l'expert, accompagné, si besoin est, au minimum d'un spécialiste en structure et d'un spécialiste en auscultations.

[19] À ne pas confondre avec l'expert désigné par un tribunal, par exemple, dans le cas d'un contentieux

3.2.5.4 L'inspection détaillée

Photo n° 28 : inspection détaillée du pont de la Caille (crédit photo D. Poineau)

> Quand elle s'avère nécessaire et après avoir été acceptée par le maître d'ouvrage, cette inspection comprend deux phases :

- u**ne préparation soignée,** destinée à vérifier et compléter les informations recueillies lors de la visite préliminaire ainsi qu'à recenser les moyens d'accès et toutes les dispositions prises (par exemple, les mesures de sécurité) ;

- **l'inspection proprement dite,** qui consiste à faire un relevé, normalement sur plans, de tous les désordres visibles et tous renseignement utiles tels que :

  - la présence d'anciens revêtements ou de produits d'imprégnation,
  - l'apparence de la surface du béton, présence de stalactites, d'efflorescences, de traces de rouille,
  - la présence de fissures (avec leurs ouvertures et leurs orientations, réseau),
  - les détériorations de la peau du béton (épaufrures, feuilletage, éclatements…),
  - la détection des zones sonnant le creux,
  - les zones où le béton et les armatures ont été désorganisés (cas d'un incendie…),
  - la présence d'armatures (passives ou actives) apparentes, corrodées ou non,
  - le relevé des déformations de la structure,
  - la détection des traces d'humidité,
  - etc.

Nota : *lorsque la construction présente des désordres structuraux, il faut reporter les désordres liés à cette pathologie identifiée (principalement les fissures) sur des plans sur lesquels figurent le coffrage, le ferraillage, voire le câblage de l'ouvrage. Cette façon de procéder, en faisant apparaître les erreurs de conception ou d'exécution correspondantes, permet, très souvent, d'identifier les causes des désordres.*

Pour établir ce relevé, il est possible de se référer à certains des documents spécifiques (guides des défauts) visés dans l'appendice et tout particulièrement dans les documents suivants : [13], [14], [15], [16], [18], [19].

3.2.5.5 Les investigations in situ

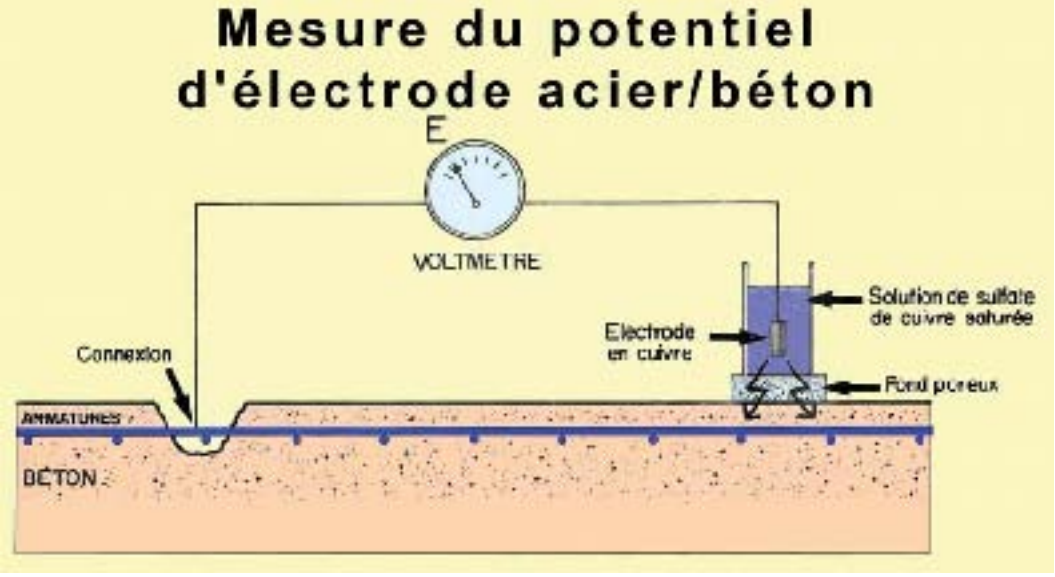


Figure n° 9 : principe de la mesure du potentiel de corrosion

Dans les cas difficiles, notamment lorsque c'est le matériau béton armé, voire précontraint, qui est en cause, on peut être amené à réaliser **des investigations in situ.** Par exemple :

- les mesures relatives **aux armatures** : enrobage ; estimation des surfaces corrodées et évaluation des risques de corrosion, mesures du potentiel de corrosion ; mesure de la résistivité ; estimation de la vitesse de corrosion. Il faut y ajouter le type d'armature et ses caractéristiques mécaniques[20];
- les mesures relatives **à la qualité du béton** ou à son vieillissement (profondeur de carbonatation, perméabilité, cohésion superficielle, c'est-à-dire la résistance à la traction de la surface du béton, des mesures de la vitesse du son…) ;
- les investigations à mener sur le matériau béton qui a été soumis à un incendie figurent dans un document du LCPC intitulé «Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie» **Méthodes d'essais des LPC n°62 – décembre 2005 ;**

[20] Les caractéristiques des armatures de béton armé depuis les débuts de cette technique à nos jours sont données dans l'annexe n°3 au présent guide qui présente un bref historique du béton armé. Pour les armatures de procédés de précontrainte, il faut se référer à un guide de l'AFGC à paraître sur la durabilité de la précontrainte (la partie du guide relative à l'historique de la précontrainte est disponible au LCPC et au SETRA

- la présence de produits nocifs (amiante, plomb…) ;
- le métré de l'ouvrage, des superstructures et accessoires d'équipement, des réseaux. Cette évaluation des charges permanentes sert au recalcul, si besoin est… ;
- des essais de chargement avec mesure des déformations (flèches) et des contraintes (jauges et capteurs de déplacement) ;
- des mesures du trafic qui peuvent être utilisées lors du recalcul (étude des phénomènes de fatigue…)…

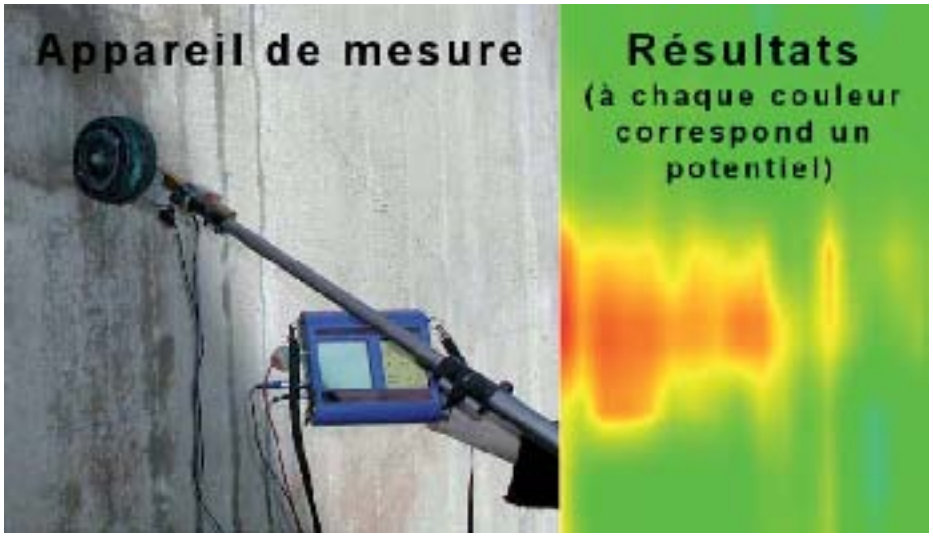


Photo n° 29 : réalisation d'une mesure de potentiel
(crédit photo CEBTP-SOLEN - Division Pathologie des ouvrages Ile-de-France - G. Taché)

> Lorsqu'une corrosion des armatures est détectée à un endroit :

- **s'il s'agit d'un ouvrage âgé de quelques dizaines d'années,** il est impératif de déterminer si la corrosion est localisée ou généralisée et où se situe le front de carbonatation, voire celui des chlorures. Ces investigations permettront de savoir, par exemple :
  - s'il sera nécessaire de dégager totalement les armatures de leur gangue de béton avant de les réenrober dans un nouveau béton
  - si une opération de déchloruration ou de réalcalination est possible… ;
- **s'il s'agit d'un ouvrage récent** non situé dans un environnement particulièrement agressif, il est vraisemblable que ce désordre corresponde à un défaut d'enrobage local (à vérifier). Si ce n'est pas le cas, les investigations doivent porter sur la présence de produits agressifs, sur la qualité du béton… ;

Les mesures du potentiel d'électrode peuvent être interprétées comme suit, sachant qu'il est impératif d'observer visuellement l'état réel des armatures avant de conclure :

Potentiel de corrosion (électrode Cu/CuSO4) mesuré en mV	Probabilité de corrosion
E > -200	(< 10%) peu probable
-200 > E ≥ -350	(~50%) corrosion incertaine
-350 > E ≥ -500	(50 à 90%) corrosion très probable

Tableau n° 4 : probabilité de corrosion en fonction du potentiel de corrosion

Les mesures de résistivité (apparente ρa) peuvent être interprétées, avec beaucoup de précautions, comme suit :

Résistivité mesuré en Ωm	Probabilité de vitesse de corrosion importante
ρa > 1 000-2 000	Négligeable (béton trop sec)
500 < ρa ≤ 1 000	Faible
100 < ρa ≤ 500	Modérée à forte quand l'acier est actif (zones humides)
ρa < 100	La vitesse de corrosion n'est pas régie par la résistivité

Tableau n° 5 : probabilité de la vitesse de corrosion en fonction de la résistivité du béton

Les mesures de l'intensité du courant de corrosion peuvent être interprétées, avec beaucoup de précautions, en utilisant les données du tableau ci-après. Ce tableau a été élaboré en utilisant la loi de Faraday[21] donnant la masse de métal consommée lors d'une corrosion galvanique :

$$m = \frac{1}{F}\cdot\frac{A}{n}\cdot I.t$$

La réduction annuelle de l'épaisseur «Δe» vaut :

$$m = \rho.S.\Delta e \quad \frac{A}{n}.I.t \text{ d'où } \Delta e = \frac{A}{n.F.\rho}.t.\frac{I}{S}$$

Avec :

ρ = masse volumique de l'acier (7800 kg/m^3)
S = surface de la pièce (m^2)
Δe = variation d'épaisseur de la pièce métallique sur une période de 1 an (m)
A = masse atomique du métal (55, 85x10^{-3} kg/mol)
n = valence (2 pour le fer Fe^{2+})
I = intensité du courant (A)
i = densité de courant en (A/m^2)
t = 1 an = 3,1536x10^7 secondes
F = constante de Faraday = 96 500

[21] *Se reporter à la méthode RILEM[TC-154-EMC].*

On en déduit :

$$\Delta e(m) = 0{,}001169\, i(A/m^2)$$
$$ou\ \Delta e(mm) = 0{,}01169\, i(\mu A/m^2)$$

Courant de corrosion mesuré en µA/cm²	Vitesse de corrosion en mm/an	Niveau de corrosion
< 0,1	< 0,001169	Négligeable
0,1 < et ≤ 0,5	0,001169 < et ≤ 0,00585	Faible
0,5 < et ≤ 1	0,00585 < et ≤ 0,01169	Modérée
> 1	> 0,01169	Élevée

Tableau n° 6 : vitesse et niveau de corrosion en fonction de l'intensité du courant de corrosion

Il n'est pas possible de présenter dans le présent guide toutes les méthodes d'investigation sur les matériaux, d'une part, et les structures, d'autre part. Ce domaine est précisé dans certains des documents de référence **de l'appendice** et tout particulièrement dans les documents suivants auxquels le lecteur est invité à se reporter : **[6], [8], [9], [10], [12], [20], [21], [22], [23].** Le guide de l'AFGC [23] traite de la méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton et particulièrement des mesures sur la corrosion.

3.2.5.6 Les analyses et essais de laboratoire

Le diagnostic peut être complété par des analyses et essais de laboratoire effectués sur des échantillons prélevés dans les règles de l'art dans les zones représentatives des états de dégradation, par carottage ou forage (par exemple, procédures normalisées, procédures **AFREM**, procédures du **LCPC**...). Bien entendu, les essais et analyses dépendant des types de désordres constatés. Il y a lieu de citer :

> des caractérisations de type chimique :

- une analyse chimique globale destinée à déterminer les caractéristiques du béton, dont la teneur en ciment,
- des déterminations ciblées : la teneur en chlorures (NF EN 14629), la profondeur de carbonatation (NF EN 14630), la teneur en sulfates, en sulfures... ;

> des caractérisations de type minéralogique :

- par microscopie optique pour la détermination de la nature du ciment ou électronique à balayage (MEB) pour une micro-analyse élémentaire,
- par diffraction X pour la recherche et la caractérisation des phases cristallines ;

> des caractérisations de type physique, notamment :

- la porosité à l'eau,
- la perméabilité,

- la diffusivité des corps tels que les chlorures,
- l'absorption capillaire,
- les résistances mécaniques du béton et les vitesses du son correspondantes,
- les résistances mécaniques des armatures passives ou actives…

Photo n° 30 : mesure de la profondeur de carbonatation (crédit photo Lerm)

3.2.5.7 Les vérifications en bureau d'études

> En s'aidant du dossier de l'ouvrage et des autres documents disponibles (photos de chantier, articles dans les revues techniques, la presse nationale ou locale…) s'ils existent, il faut :

- analyser toutes les pièces **du dossier de l'ouvrage** et, en particulier, tous les documents d'exécution (comptes rendus des réunions, résultats des mesures et contrôles effectués sur le chantier, incidents d'exécution [fiches de non–conformité], traitements des non-conformités, documents ayant trait à la gestion de l'ouvrage [PV des visites et inspections détaillées, opérations d'entretien et réparations effectuées])… Par exemple, de cette analyse il est possible de tirer :

  - la liste de toutes les pièces du dossier et aussi les pièces manquantes,

  - la date de réception et les dates des fins de responsabilités et garanties,

- les hypothèses de calcul et les règles de calcul utilisées (coefficients de pondération des actions, coefficient de minoration des résistances des matériaux…),
- le calendrier d'exécution prévu et celui réalisé,
- l'ordre des opérations prévu et celui réalisé,
- les caractéristiques des matériaux mis en œuvre (résistance, modules…),
- les efforts mis en œuvre (par exemple, la tension des armatures de précontrainte, les valeurs des réactions d'appui…),
- les incidents ou accidents d'exécution et, en particulier, les anomalies climatiques,
- l'état de l'ouvrage lors de sa réception (défauts et désordres existants),
- les caractéristiques des chargements effectués lors des épreuves de l'ouvrage,
- les caractéristiques des convois exceptionnels les plus lourds ayant emprunté l'ouvrage,
- la date d'apparition des désordres,
- les réparations effectuées…

- analyser les résultats de l'inspection détaillée, les photos et relevés effectués pour en tirer les causes probables des désordres (fissures de flexion, d'effort tranchant, fissures dues aux retraits…) ;
- analyser les plans, les hypothèses de calcul et les notes de calculs afin d'y détecter des imprécisions, des approximations, des erreurs… ;
- interpréter les résultats des mesures effectuées sur le fonctionnement de la structure lors des investigations in situ (déformations sous chargement calibré, pesée des réactions d'appui…) ;
- fixer **les hypothèses du recalcul,** la modélisation de la structure, les programmes à utiliser (se rappeler qu'indépendamment des erreurs de conception, d'exécution…, les désordres apparaissent sous **les cas de charges qu'a réellement subi la structure** et non sous **les combinaisons des charges nominales ou caractéristiques** des règles de calcul) ;
- recalculer l'ouvrage et s'assurer que **les résultats obtenus expliquent les désordres et sont en accord avec le fonctionnement réel de la structure** (par exemple, sous les charges d'épreuves, existence de tractions dans le béton au droit des zones fissurées, réactions d'appui calculées très proches des réactions mesurées…) ;
- en déduire la force portante de l'ouvrage, les insuffisances structurales actuelles, voire les insuffisances à venir (cas d'existence de vices cachés)…

Il n'est pas possible de présenter dans le présent guide les méthodes de recalcul des structures. Ce domaine est précisé dans certains des documents de référence de **l'appendice** et tout particulièrement dans les documents suivants auxquels le lecteur est invité à se reporter : **[6], [11], [12].**

ATTENTION, *il n'existe pas* ***de règles nationales françaises pour l'évaluation des ouvrages existants*** *et les règles de calcul du BA et du BP ne sont pas directement applicables au recalcul d'une structure ancienne. Il est possible de procéder à certaines adaptations (par exemple, il est possible, dans certains cas, de réduire, d'une part, les coefficients de pondération des sollicitations dues au poids propre si les charges permanentes ont pu être métrées et, d'autre part, d'augmenter les coefficients de minoration des résistances des matériaux anciens, sous réserve qu'ils ne soient pas trop hétérogènes…).*

Une réflexion s'impose donc et l'expert doit valider les hypothèses du recalcul ainsi que la modélisation de la structure ainsi que les résultats obtenus[22] (voir tout particulièrement le document [12]).

3.2.5.8 Le rapport de diagnostic

Il présente l'ensemble des résultats et leur interprétation. Il doit être rédigé dans le souci d'être compréhensible pour un non initié.

> Il comprend :

- l'identification de l'ouvrage, le nom du demandeur ;
- l'identification du laboratoire ou de l'ingénieur chargé de l'étude, la date ;
- une brève description de l'ouvrage ;
- le rappel des objectifs de l'étude ;
- la liste des documents consultés,
- les résultats de l'inspection détaillée ;
- les résultats des essais in situ et de laboratoire s'il y a lieu ;
- une discussion sur l'origine des désordres, leur étendue, leur évolution probable et leur incidence sur la sécurité ;
- des conclusions claires sur les désordres constatés et des propositions éventuelles de complément d'étude, des conseils sur l'exploitation de l'ouvrage (maintien ou renforcement des limitations, construction d'un ouvrage provisoire…) ;
- des conclusions claires sur les éventuels recours en responsabilités et garanties ;
- une liste des priorités pour les réparations et travaux à effectuer ;
- des recommandations relatives aux méthodes de réparation les mieux adaptées.

[22] *Ce peut être le cas, par exemple, si le recalcul montre que la presque totalité de l'ouvrage présente une insuffisance de résistance mais sans expliquer pourquoi les fissures n'existent que dans certaines zones !*

«La responsabilité décennale joue lorsque les désordres rendent l'ouvrage impropre à sa destination. Les désordres qui compromettent la solidité de l'ouvrage l'affectent dans un de ses éléments constitutifs ou dans l'un de ses éléments d'équipement (il s'agit d'éléments d'équipement dont la dépose ou la repose ne peut s'effectuer sans détériorer l'ouvrage)».

Figure n° 10 : extrait de l'arrêt Trannoy du Conseil d'État du 2 février 1973

Se rappeler «que toute réparation sans un diagnostic préalable ou issue d'un diagnostic erroné est vouée à l'échec».

3.2.6 LE PROJET DE RÉPARATION

> Cet article comporte trois parties :

- la première concerne **la méthodologie** à suivre pour élaborer un projet de réparation ;
- la seconde traite **des différentes méthodes de réparations** utilisables en fonction **des origines** (physique, chimique et mécanique) des désordres constatés ainsi qu'en cas de RGI;
- la troisième traite **des différentes méthodes de réparation** utilisables en cas **de corrosion** des armatures passives, voire actives. Ces méthodes complètent, en tant que de besoin, les méthodes de réparation visées dans la seconde partie.

Le guide de novembre 2003 de l'AFGC : Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion, donne, dans son annexe A4, des conseils pour commander **une étude technique.**

3.2.6.1 La consistance d'un projet de réparation[23]

3.2.6.1.1 L'étude préliminaire

Avec les éléments dont il dispose, dont le rapport de diagnostic, **le maître d'ouvrage** peut prendre **une première décision :** accepter tout ou partie des différentes solutions proposées par **l'expert**, puis **lancer l'étude préliminaire** des solutions retenues :

- maintien en l'état avec limitations ;
- réparation (souvent plusieurs solutions sont envisageables) ;

[23] Pour les études concernant la réparation des ouvrages de stockage et de transport d'eau, il est possible de consulter la recommandation T1-96 du GPEM/TMO du 6 décembre 1996.

- démolition-reconstruction ;
- fermeture et démolition…

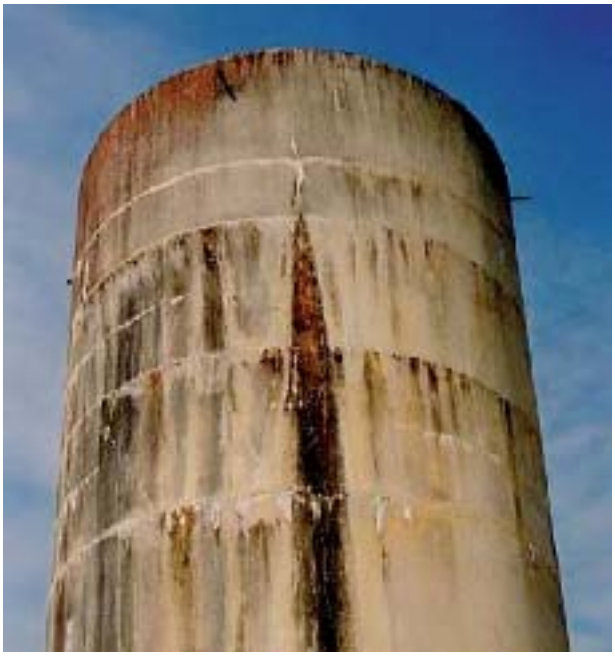


Photo n° 31 : désordres d'un réservoir d'eau potable (crédit photo D. Poineau)

Le maître d'ouvrage doit fixer **les objectifs que la réparation (ou le renforcement) doit atteindre ainsi que les contraintes environnementales et sociétales à respecter pendant les travaux** (par exemple, augmentation de la capacité portante, résistance au gel-dégel, respect de la loi sur l'eau, limitation du niveau de bruit dans les bâtiments habités, mise en place d'une déviation pour un pont, construction d'une passerelle provisoire pour les piétons, maintien en service de l'ouvrage pendant la majeure partie des travaux). Cet ensemble fait l'objet d'un document appelé **«le programme du maître d'ouvrage».**

> Cette étude doit intégrer à la fois :

- le coût purement financier de l'opération ;
- les contraintes environnementales et sociétales, qui ont aussi leur coût ;
- les contraintes techniques d'exécution (moyens d'accès à l'ouvrage pour effectuer les travaux, matériels utilisables [fonction de la géométrie de la structure et des possibilités d'accès], techniques d'exécution à privilégier pour éviter les traumatismes aux matériaux, étaiements provisoires et/ou renforcements provisoires indispensables…) ;
- l'intervention **du maître d'ouvrage** et de **son maître d'œuvre** lors **des revues de projet, qui sont indispensables pour éviter les dérives (par exemple, non respect des exigences du maître d'ouvrage, réparation inadaptée par son importance et son coût aux désordres constatés…).**

ATTENTION, *un projet de réparation ou de renforcement diffère sur bien des points d'un projet d'ouvrage neuf. En effet :*

- la réparation (ou le renforcement) peut imposer à la structure des efforts locaux ou généraux pour lesquels elle n'a pas été conçue, ce qui peut imposer des renforcements ;
- de plus, la géométrie de la structure est fixée ainsi que le ferraillage et le câblage ;
- les dimensions et la position des armatures peuvent ne pas être conformes **aux plans d'exécution.** Il est, en effet, exceptionnel de disposer **des plans de recollement ;**
- les ouvrages anciens ont des dispositions constructives parfois inhabituelles…

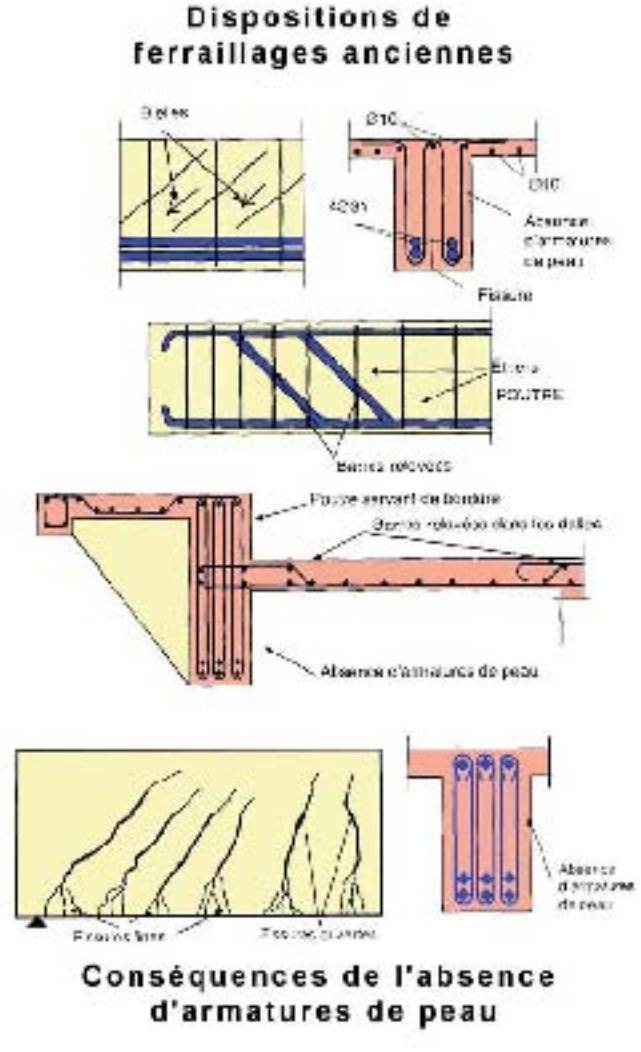


Figure n° 11 : dispositions des armatures dans des ouvrages anciens

Photo n° 32 : adaptation du matériel de vérinage aux emplacements disponibles (crédit photo VSL France - M. Loubeyre)

Il faut donc adapter le projet de réparation et les procédures d'exécution à la structure existante et non l'inverse ! Il faut, en outre, s'assurer que le matériel nécessaire pour exécuter les travaux pourra être mis en œuvre sans difficulté (par exemple, vérifier que les vérins de mise en tension de la précontrainte additionnelle peuvent passer par les trous d'homme existants au droit des entretoises d'une poutre-caisson).

> En final toute étude doit expliciter :

- la signalisation du chantier ;
- les moyens d'accès nécessaires ;
- les moyens et matériels à mettre en œuvre ;
- l'ordre d'exécution des travaux ;
- les risques encourus ;
- les contrôles à effectuer ;
- la durée d'exécution des travaux, y compris la période la plus favorable ;
- le coût de l'ensemble de l'opération (travaux annexes, ouvrages provisoires, études, travaux et contrôles) ;
- **les variantes de conception et d'exécution** envisageables.

L'expérience montre que, malgré les soins apportés à la mise au point d'un projet de réparation, il est parfois nécessaire d'y apporter **certaines modifications lors des travaux** à cause des observations faites pendant ceux–ci (par exemple : armatures absentes ou déplacées, nids de cailloux ou vides cachés…).

Nota : *l'étude du projet doit être adaptée lorsque la réparation fait appel à* ***des traitements électrochimiques*** *(protection cathodique, ré-alcalinisation…). Se reporter, par exemple, à la norme* ***NF EN 12696*** *applicable à la protection cathodique et au fascicule de documentation* ***FD CENT/TS 14038-1*** *qui traite de la ré-alcalinisation en cas de carbonatation… Ces documents ont un domaine d'emploi bien défini qu'il est indispensable de respecter.*

3.2.6.1.2 L'avant-projet de réparation et le dossier de consultation des entreprises

Le maître d'ouvrage, aidé par **son maître d'œuvre,** voire, en complément, par **son conseiller technique,** fixe la ou les solutions qui doivent faire l'objet **d'un avant-projet de réparation (APR)** puis **d'un dossier de consultation des entreprises (DCE).**

L'APR est élaboré suivant la même démarche que l'étude préliminaire, sachant qu'il a pour but de mettre au net et dans les détails la ou les solutions retenues.

Lors de la rédaction **du DCE** et de ses pièces écrites, il est important de traiter en détail **les six points suivants que l'entrepreneur** devra prendre en compte lors de la réalisation des travaux (se reporter **aux recommandations de 1993** pour la rédaction **de marchés de réparation d'ouvrages d'art,** document édité par le **Sétra**) :

1. **les sujétions d'exécution à prendre en compte (voir l'article précédent),**
2. **les investigations et les études déjà effectuées et celles à effectuer par l'entrepreneur (voir ci-après) ;**
3. **les travaux à réaliser (consistance détaillée des travaux de réparation ou renforcement) ;**
4. **l'assurance de la qualité (la plupart des documents [procédures et documents de suivi] sont spécifiques) ;**
5. **les responsabilités et garanties (voir ci-après) ;**
6. **les variantes et propositions techniques (voir ci-après).**

Le point n°2 a pour but de fixer ce qui est de **la responsabilité de l'entrepreneur, de celle du maître d'ouvrage et du maître d'œuvre** en particulier sur **«l'état de l'ouvrage».** Trois solutions sont possibles :

- l'état de l'ouvrage est fixé par **le marché** (par exemple, si la qualité de l'expertise ne laisse planer aucun doute sur l'état et la capacité portante de la structure…) ;
- la détermination de l'état de l'ouvrage est mise **à la charge de l'entrepreneur** (il est nécessaire de fixer un cadre, par exemple, les hypothèses à prendre en compte, les investigations et les calculs à effectuer) ;
- l'état de l'ouvrage est donné **à titre indicatif par le marché** (il est cependant nécessaire de fixer les objectifs à atteindre, voire les investigations minimales à effectuer).

Le point n°5 rappelle qu'une opération de réparation ou de renforcement mal étudiée ou mal conduite peut entraîner des désordres dans la structure existante, voire son effondrement et provoquer également des dommages à des tiers ou à des usagers. Il est donc indispensable que **l'entrepreneur** soit correctement assuré vis-à-vis de ces risques. **Le Cahier des Clauses Administratives Particulières (CCAP)** doit fixer les règles du jeu indispensables.

Le point n°6 précise que le Règlement de la Consultation (RC) doit indiquer si **les variantes** sont autorisées (il faut fixer le type et nombre des variantes). Il doit également définir **les propositions techniques** auxquelles **l'entrepreneur** doit répondre.

Rappel : une variante peut être de conception ou d'exécution et elle a toujours une incidence sur les quantités et les prix.

> Il est possible de distinguer (se reporter à la directive «DJ 75» sur le jugement des offres éditée par le Sétra) :

- **les variantes larges** (en réparation, elles jouent en cas **de conception-réalisation,** ce qui ne doit pas supprimer l'expertise et les études préalables, bien au contraire) ;
- **les variantes limitées majeures** (jouent sur la conception et la réalisation) ;
- **les variantes limitées mineures** (jouent sur la conception ou la réalisation) ;

Rappel : une proposition technique ne doit pas avoir d'incidence sur les quantités et les prix (par exemple, elle concerne le procédé de précontrainte sous réserve que la puissance des câbles reste quasiment la même : le remplacement de torons clairs par des torons gainés-protégés est une variante de conception, car les coefficients de frottement sont fort différents entre les deux types de câbles, donc les quantités de précontrainte à mettre en œuvre sont différentes).

3.2.6.2 Les méthodes de réparation à mettre en œuvre en cas de désordres d'origine physique, chimique et mécanique

3.2.6.2.1 Généralités

Avertissement : si l'origine des désordres conditionne normalement le choix de la ou des méthodes de réparation à utiliser, **l'importance des désordres, le coût de la réparation et les exigences du maître d'ouvrage** jouent également dans ce choix. Il appartient donc **au concepteur du projet de la réparation** de faire la synthèse de toutes ces contraintes pour proposer **la ou les solutions optimales et,** parfois, **la démolition-reconstruction.**

La partie du présent document qui décrit **les solutions de réparation les plus courantes en fonction de l'origine des désordres** doit être considérée comme **un guide et non comme un livre de recettes.** Elle n'a pas pour but de se substituer **au concepteur du projet de réparation** qui est indispensable pour finaliser une solution de réparation efficace et durable.

Dans le cas où **les armatures sont soumises à la corrosion,** il faut compléter les méthodes de réparations proposées par celles développées dans l'article 3.2.6.3 ci-après.

ATTENTION, *une structure peut présenter des désordres dus à* ***plusieurs causes qui agissent de concert,*** *comme :*

- des causes chimiques (par exemple, l'eau de pluie qui peut être pure ou acide [présence de gaz dissous tels que SO2 ou CO2], voire mélangée à des fondants [présence de chlorures];
- des causes physiques comme le gel…

La réparation doit être capable de résister, d'une part, **aux divers agents agressifs d'origine chimique** et ce, en fonction du degré d'agressivité mesuré pour chacun de ces produits (rappel, le **FD P 18-011** vise quatre niveaux de A1 à A4) et, d'autre part, **aux agents agressifs d'origine physique…** La formulation des produits de réparation doit satisfaire à ces exigences multiples.

Une même technique de réparation (par exemple, la restauration du béton par ragréage manuel ou mécanisé) peut être utilisée pour palier aux désordres du béton dus à différentes causes (par exemple, le gel de surface, l'érosion superficielle, un choc léger…). **Les trois principales méthodes** qui permettent, soit la simple restauration du béton (géométrie et fonction), soit le renforcement structural de l'ouvrage (restauration ou augmentation de la portance), sont listées ci-après puis détaillées afin d'éviter des redites et des développements inutiles dans les paragraphes qui suivent. **Ces trois méthodes sont :**

- **la restauration du béton par ragréage ;**
- **la restauration du béton par bétonnage ;**
- **le renforcement structural par l'ajout de matière (mortier ou béton).**

Les mortiers ou béton sont mis en œuvre, suivant les cas, manuellement ou mécaniquement.

Des opérations préalables à la réparation sont nécessaires. Comme elles sont très voisines pour les **trois méthodes de réparation,** elles sont décrites sommairement ci-après, sachant qu'elles seront développées dans la suite du présent guide à l'article 4.3.3 ci-dessous.

> C'est ainsi que la zone, l'élément ou la structure à réparer doivent être soumis à une préparation du support en béton et, si besoin est, des armatures, qui va permettre :

- d'éliminer le béton désorganisé ou pollué (cf. l'expertise préalable qui définit le traitement, son étendue et sa profondeur) ;
- de traiter, si besoin est, les armatures apparentes contre la corrosion ;
- de remplacer les armatures abîmées et déformées ;
- d'ajouter les armatures nécessaires (armatures de couture et autres) ;
- de nettoyer les surfaces par voie sèche (brossage soigné, aspiration…) ou humide (lavage à l'eau…) pour terminer.

Remarque sur la préparation des armatures : ***si les armatures sont corrodées,*** *il est nécessaire de les dégager complètement de leur gangue de béton (se reporter à l'article 4.2.1.2.3 ci-après qui détaille les opérations à effectuer). Dans le cas contraire, ce dégagement total n'est pas nécessaire, à condition que le béton qui les entoure ne soit pas désorganisé ou pollué.*

Dans certains cas, cette préparation de surface peut comporter en plus la mise en place d'une barbotine ou d'une colle pour augmenter l'adhérence du produit de réparation.

1. La restauration du béton par ragréage :

La restauration du béton au moyen **d'un mortier de ragréage** est une réparation à caractère discontinu qui ne traite que les zones dégradées sans toucher aux zones intactes. Elle concerne surtout **la reconstitution de la peau du béton,** c'est-à-dire l'enrobage des armatures, bien qu'il soit possible de traiter **des épaisseurs plus importantes.** L'ensemble de la surface après réparation doit recevoir **un revêtement de protection.**

Si les défauts sont généralisés à une grande partie de la surface, il est préférable d'envisager une restauration de la peau du béton en utilisant une technique à grand rendement et en veillant au coût du produit (par exemple, recours à **un mortier ou un béton projeté** appliqué sur toute la surface). Nous n'examinerons ici que la technique du ragréage, la mise en œuvre du béton projeté faisant l'objet du **GUIDE N°5 [FABEM],** spécifique à cette technique.

Les ragréages sont effectués avec des mortiers à base de liants hydrauliques modifiés par des polymères dans la majorité des cas, voire plus rarement par des mortiers à base de liants organiques[24] (époxydes, polyuréthannes,...). La suite du document explicite le choix des produits de réparation, qui doivent être compatibles avec le béton existant et résister à l'environnement agressif cause des désordres. Pour améliorer l'adhérence entre l'ancien béton et le nouveau béton, une couche d'accrochage peut être mise en œuvre si un décollement risque de se produire.

Les mortiers de ragréage peuvent être mis en œuvre manuellement (truelle et taloche) ou mis en place par des moyens pneumatiques puis talochés pour finir. Lorsque les épaisseurs à mettre en œuvre sont importantes, le mortier est mis en place en plusieurs couches.

Il est recommandé de mettre en œuvre sur toute la surface de l'ouvrage un produit de protection (peinture, revêtement) qui aura l'avantage de limiter la pénétration des agents agressifs dans les zone non réparées et dans les microfissures se produisant à l'interface des zones de reprise et aussi de supprimer l'aspect **«peau de léopard»** dû aux ragréages discontinus.

Il faut veiller enfin :

- **à améliorer l'évacuation des eaux à l'extérieur de la structure** (par exemple, par une réfection de la chape d'étanchéité et des dispositifs de drainage) d'une part ;
- **à ne pas empêcher l'eau de s'évacuer** au cas où celle-ci pourrait s'infiltrer dans la structure (par exemple, par un défaut de la chape d'étanchéité) d'autre part, ce qui conduit, le plus souvent, à ne pas protéger l'intrados de l'ouvrage.

2. La restauration du béton par bétonnage :

Lorsque qu'une structure présente des désordres importants, le ragréage classique est insuffisant pour reboucher des cavités profondes ou réhabiliter un élément complètement désorganisé d'une structure. La technique de réparation consiste **à reconstituer la géométrie de la pièce** au moyen d'un béton, voire d'un produit de réparation (si les quantités à mettre en œuvre ne sont pas trop importantes).

[24] *Un liant organique est un liant à base de résines de synthèse*

Si nécessaire, de nouvelles armatures, dites de couture, scellées dans le béton conservé, sont à mettre en place pour améliorer la liaison entre les deux bétons d'âges différents. D'autres armatures sont éventuellement nécessaires.

Le béton de réparation doit être compatible avec le béton de la structure, c'est-à-dire avoir des caractéristiques similaires (résistance, déformabilité…), tout en étant formulé (présence d'ajouts, d'additions…) pour résister à l'environnement agressif, cause des désordres. La suite du document explicite le choix des produits de réparation. Pour améliorer l'adhérence entre l'ancien béton et le nouveau béton, une couche d'accrochage peut être mise en œuvre.

Le béton peut être coulé en place classiquement après mise en place d'un coffrage, ou projeté ou injecté sous pression suivant la position de la pièce à reconstituer (au sol, au plafond…). Après durcissement du béton, la zone d'interface entre l'ancien béton et le nouveau peut être injectée si un décollement risque de se produire (par exemple, sous les effets des retraits).

Dans le cas de reconstitution de la totalité d'un élément de structure, **la technique de réparation doit permettre à l'élément réparé de reprendre les efforts appliqués à la structure** (se reporter au paragraphe consacré au renforcement structural qui suit et qui explicite les moyens à utiliser).

Si besoin est, **un revêtement de protection** est à appliquer sur l'élément ayant fait l'objet de la réparation, voire sur l'ensemble de la pièce.

Une fois réparée, la structure doit être protégée contre les effets des eaux (réparation ou remplacement de la chape d'étanchéité, remise en état des dispositifs de drainage…).

3. Le renforcement structural par ajout de mortier ou de béton :

Il est possible d'augmenter la section d'une pièce, soit localement, soit sur toute sa longueur, par ajout d'un béton, voire d'un produit de réparation sous forme de mortier (si les quantités à mettre en œuvre ne sont pas trop importantes). Ce béton ajouté doit être lié à la structure par des armatures de couture auxquelles peut se substituer partiellement une colle placée entre le béton durci et le béton frais. Le béton ajouté sert à réenrober les armatures existantes réhabilitées, voire des armatures supplémentaires qui servent à augmenter la résistance de la structure.

Le béton de réparation doit être compatible avec le béton de la structure, c'est-à-dire avoir des caractéristiques similaires (résistance, déformabilité…), tout en étant formulé pour résister à l'environnement agressif cause des désordres. La suite du document traite du choix des produits de réparation.

Le béton peut être coulé en place classiquement après mise en place d'un coffrage, ou projeté ou injecté sous pression suivant la position de la pièce à reconstituer (au sol, au plafond…).

Le béton ajouté doit pouvoir reprendre les efforts appliqués à la structure. Si la structure est mise sur cintre, voire vérinée avant le renforcement, le décintrement qui est effectué après durcissement du béton lui permet de participer à la reprise d'une partie des charges permanentes (poids propre, poids des équipements…) et des charges d'exploitation. Dans le cas contraire, il peut ne reprendre qu'une partie des charges d'exploitation.

Si besoin est, **un revêtement de protection** est à appliquer sur l'élément ayant fait l'objet de la réparation, voire sur l'ensemble de la pièce.

Une fois réparée, la structure doit être protégée contre les effets des eaux (réparation ou remplacement de la chape d'étanchéité, remise en état des dispositifs de drainage…).

3.2.6.2.2 Les méthodes de réparation à mettre en œuvre en cas de désordres d'origine physique

Les différentes méthodes envisageables dans les divers cas de désordres d'origine physique sont résumées sur le tableau suivant (y compris celles qui ne sont pas développées dans le présent guide et qui sont indiquées en italiques) :

ATTENTION, *les informations contenues dans ces tableaux sont à appliquer avec* ***«précautions». Il est rappelé que le présent guide n'a pas pour but de se substituer au concepteur de la réparation*** *qui a pour rôle de mettre au point le projet en faisant la synthèse de toutes les exigences à satisfaire.*

Méthodes de réparation et de protection	Béton dégradé par des causes physiques									
	Gel de surface	Gel à cœur		Retrait			Effets thermiques		Usure et érosion	
Cas à considérer	**1**	**1**	**2**	**1**	**2a**	**2b**	**1**	**2**	**1**	**2**
La restauration du béton par : ■ ragréage ■ bétonnage	O	O	 O=				O	 O=	O	 O=
Le renforcement structural par : ■ ajout de béton ■ *ajout d'armatures passives intérieures (G7 [FABEM])* ■ *ajout d'armatures passives extérieures (G7 [FABEM])* ■ *ajout d'armatures actives intérieures ou extérieures (G8 [FABEM])*			O= S			O Ou Ou Ou		O= S		O= S
Le traitement des fissures par : ■ *injection rigide ou souple (G3 [FABEM])* ■ *calfeutrement (G2 [FABEM])* ■ *pontage (G4 [FABEM])* ■ *revêtement armé ou non local ou général (G2 [FABEM]) ou (G4 [FABEM])* ■ *création d'un joint (G2 [FABEM])*				O=	Ou (2) Ou Ou Ou=	O (1)				
Le remplacement :			(3)							
La protection des bétons par : ■ *revêtement généralisé (G4 [FABEM])* ■ *chapes d'étanchéité (G1 [FAÉQ])...*	O	O	O S	O=	O=	O	O fS	O fS	O Sé	O Sé
La protection contre l'eau par : ■ *l'amélioration des dispositifs de drainage...*	S	S	S	S	S	S				
La régénération de la passivation	S (si besoin est)									

Tableau n° 7 : méthodes de réparation des désordres d'origine physique

Légende :
1 *cas de désordres peu importants*
2 *cas de désordres importants (2a nécessitant une réparation et 2b nécessitant un renforcement)*
3 *cas des désordres imposant le remplacement de tout ou partie de l'ouvrage visé en (3)*
O : *réparation à retenir*
Ou : *plusieurs méthodes de réparation peuvent s'appliquer, un choix est nécessaire*
O= : *réparations pouvant satisfaire le même objectif (utiliser l'une ou l'autre)*
fS : *protection contre les effets du feu, si besoin est*
Sé : *protection contre l'érosion, si besoin est*
S : *si besoin est*
(1) : *produit d'injection rigide pour reconstituer la continuité du matériau béton*
(2) : *produit d'injection souple pour boucher les fissures*
(3) : *remplacement de tout ou partie de l'ouvrage s'applique ici, si on est dans le cas 3*

3.2.6.2.2.1 Les méthodes de réparation d'un béton dégradé par le gel de surface (écaillage)

> L'opération de restauration du béton d'un élément, d'une partie ou de la totalité d'une structure dégradée par le gel de surface comprend :

- une préparation de surface avec l'élimination du béton dégradé et du béton pollué (par les chlorures, par exemple) ;
- la reconstitution de la peau (enrobage des armatures) par un ragréage manuel ou mécanisé, voire par projection (produit de réparation ou mortier ou béton) ;
- la mise en œuvre obligatoire d'un revêtement de protection pour éviter le retour des désordres sur toutes les surfaces concernées par le phénomène ;
- la protection de la structure réparée contre les effets des eaux (drainage) si besoin est.

Photo n° 33 : application d'un revêtement sur la corniche d'un pont

3.2.6.2.2.2 Les méthodes de réparation d'un béton dégradé par le gel interne

ATTENTION, ***un béton gélif après réparation reste gélif*** *s'il absorbe de l'eau, puisqu'en cas de gel, faute de bulles d'air en quantité suffisante, la glace formée dans les pores internes ne pourra s'expanser. En conséquence, si l'expertise montre que la désorganisation du béton est relativement lente et qu'il est possible de bien protéger le béton contre les venues d'eau, voire le gel, une réparation est possible. Dans le cas contraire, il est souvent préférable de s'orienter vers* ***une solution de démolition-reconstruction*** *ou de remplacement.*

De plus, *quand il y a gel, il y a souvent utilisation de fondants. Le béton se trouve donc souvent pollué par les chlorures et les armatures sont souvent attaquées par la corrosion.*

Les méthodes **de restauration du béton** d'un élément, d'une partie ou de la totalité d'une structure dégradée par le gel interne sont différentes suivant **l'importance des désordres constatés :**

1. Si les désordres sont superficiels (intervention dès l'apparition des premiers désordres), l'opération de restauration du béton comprend :

- une préparation de surface avec élimination du béton dégradé et du béton pollué (par les chlorures, par exemple) ;
- la reconstitution de la peau (enrobage des armatures) par un ragréage manuel ou mécanisé, voire par projection (produit de réparation, mortier ou béton) ;
- la mise en œuvre obligatoire d'un revêtement de protection pour éviter le retour des désordres sur toutes les surfaces concernées par le phénomène ;
- la protection de la structure réparée contre les effets des eaux (drainage), si besoin est.

2. Si les désordres sont importants (intervention tardive), l'opération de restauration du béton comprend :

- une préparation de surface avec, d'une part, l'élimination du béton dégradé et du béton pollué (par les chlorures, par exemple) et, d'autre part, le traitement des armatures touchées par la corrosion ;
- si besoin est, le scellement d'armatures de couture dans le béton conservé ;
- la reconstitution de la géométrie de la pièce, voire avec des surépaisseurs par bétonnage en place ; le béton ajouté doit répondre **aux recommandations de décembre 2003 du LCPC** relatives à la durabilité des différents types de bétons durcis soumis au gel ; il peut être mis en place classiquement par injection sous pression ou par projection.
- la mise en œuvre obligatoire d'un revêtement de protection pour éviter le retour des désordres sur toutes les surfaces concernées par le phénomène, voire d'une chape d'étanchéité ;
- la protection de la structure réparée contre les effets des eaux (drainage), si besoin est.

Photo n° 34 : recommandations du LCPC pour la formulation des bétons au gel (2003) (crédit photo SCETAUROUTE)

> Exemples de réparations :

- Remplacement de la totalité du hourdis du pont à béquilles de La Neuvillette près de Reims dont le béton gélif était presque totalement désorganisé par le gel. Cet ouvrage était constitué de cinq portiques à trois articulations réunis par le hourdis.

L'ouvrage a été coupé au trafic routier (construction d'un pont provisoire), puis un cintre partiel (maintient de la circulation des péniches sous le tablier) a été mis en place et, ensuite, le hourdis a été entièrement démoli, mais, les poutres porteuses[25], non atteintes par le gel, ont été conservées. Le nouveau ferraillage du hourdis a été mis en place et lié à celui des poutres puis un nouvel hourdis a été coulé. Ces travaux ont été complétés par la mise en place d'une chape d'étanchéité et de nouveaux équipements :

Photo n° 35 : état de désorganisation du béton du hourdis (crédit photo D. Poineau)

[25] L'articulation centrale de toutes les poutres était très endommagée à cause de la percolation des eaux au travers du joint de dilatation non étanche. Le joint a été supprimé en rendant les cinq poutres du tablier continues au droit de l'articulation par soudure des armatures existantes et coulage d'un noyau de béton armé.

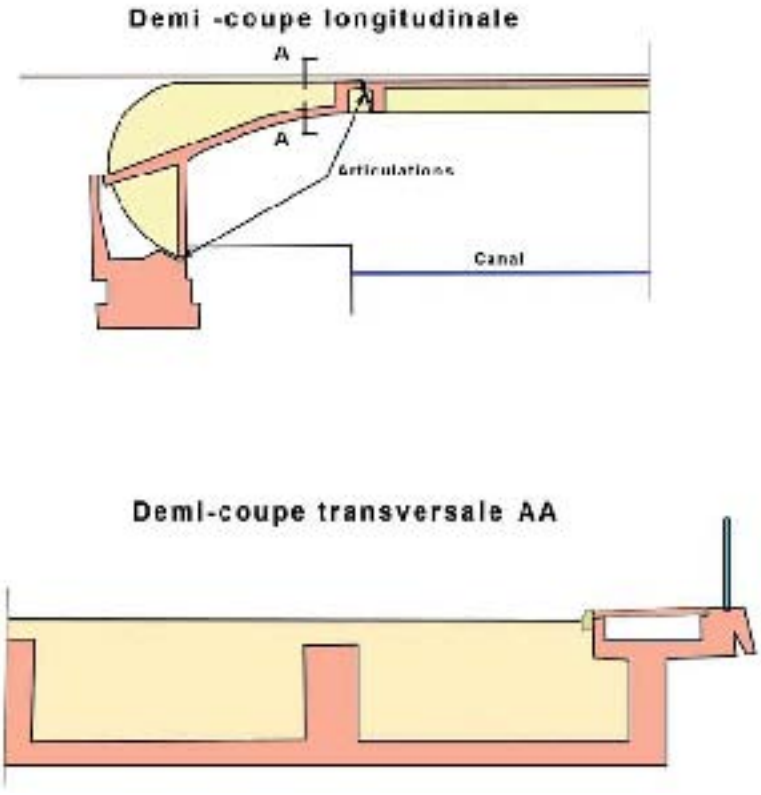


Figure n° 12 : demi-coupe longitudinale et demi coupe transversale du pont de La Neuvillette

Photo n° 36 : le tablier sur cintre après démolition du hourdis (crédit photo D. Poineau)

Photo n° 37 : le tablier après reconstitution du ferraillage du hourdis et avant bétonnage (crédit photo D. Poineau)

- Réparation locale des bandeaux de l'arc du pont de la Caille (partiellement détruits par les effets du gel, l'eau de pluie s'infiltrant dans le béton poreux de l'arc) par un béton projeté après repiquage du béton désorganisé et scellement d'armatures de couture. L'extrados de l'arc a ensuite été entièrement protégé des eaux par une chape d'étanchéité sous forme d'une feuille d'étanchéité non adhérente.

Photo n° 38 vue générale du pont de la Caille en hiver (crédit photo DDE 74)

Photo n° 39 : état du béton d'un des bandeaux de l'arc (crédit photo DDE 74)

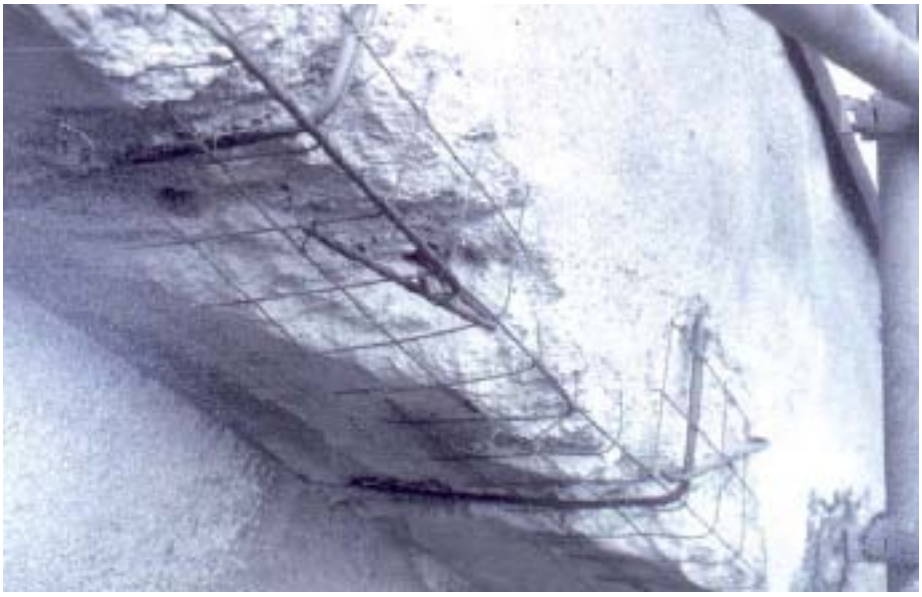


Photo n° 40 : bandeau après purge du béton désorganisé, scellement de nouvelles armatures et avant bétonnage par projection (crédit photo DDE 74)

Photo n° 41 : vue de l'arc après projection et avant mise en place d'une chape d'étanchéité (crédit photo D. Poineau)

Photo n° 42 : vue de l'arc avec sa chape d'étanchéité non adhérente (crédit photo D. Poineau)

3. **Si les désordres sont importants** (intervention tardive) et concernent des éléments non porteurs tels que des corniches, des caniveaux préfabriqués…, **la solution qui s'impose, le plus souvent, est le remplacement** par un nouvel élément **dont le béton satisfait aux recommandations de décembre 2003** du LCPC.

3.2.6.2.2.3 Les méthodes de réparation d'un béton dégradé par les effets des retraits (endogène, thermique, par dessiccation)

Les méthodes **de restauration du béton** d'un élément, d'une partie ou de la totalité d'une structure sont différentes suivant **l'importance des désordres constatés :**

1. **si les désordres sont limités à la peau du béton sous forme d'un faïençage, ou d'une fissuration fine et non traversante, la mise en place d'un revêtement de protection va permettre d'assurer la protection du béton contre la pénétration des agents agressifs et va rendre, si besoin est, un aspect satisfaisant aux parements. Se reporter au GUIDE N°4 [FABEM]. Si besoin est, il faut protéger la structure contre les effets des eaux (amélioration du drainage…).**

Photo n° 43 : revêtement de protection après réparations locales (crédit photo Parexlanko)

2. si les fissures sont largement ouvertes en surface (0,5 mm, 1 mm, 2 mm, voire plus) alors que leur ouverture diminue avec la profondeur et qu'elles sont traversantes, il est possible de conclure que ces désordres ont pour origine l'absence ou un déficit d'armatures de peau. Ces désordres peuvent ou non jouer sur le fonctionnement de la structure (capacité portante), rendre ou non l'ouvrage impropre à sa destination (par exemple, passages d'air ou d'eau) et, dans tous les cas, favoriser la pénétration des agents agressifs et la corrosion des armatures :

a. si l'expertise a montré (par exemple, par un essai de chargement) **que ces fissures ne perturbent pas le fonctionnement de l'ouvrage** (pas d'insuffisance de capacité portante), l'opération de restauration du béton d'un élément, d'une partie ou de la totalité de la structure peut faire appel aux méthodes de réparation suivantes :

- l'injection des fissures par un produit souple (voir la norme NF EN 1504-5 pour le choix des produits), qui peut s'adapter au souffle des fissures sous les variations thermiques et hygrométriques journalières et saisonnières. Se reporter au **GUIDE N°3 [FABEM],**

- le calfeutrement ou le pontage des fissures, qui jouent le même rôle que l'injection. Se reporter au **GUIDE N°2 [FABEM],**

- la mise en place d'un revêtement de protection capable de ponter (avec ou sans armature) le souffle des fissures. Se reporter au **GUIDE N°2 [FABEM]** ou au **GUIDE N°4 [FABEM],**

- la transformation de la fissure en joint de dilatation. Se reporter au **GUIDE N°2 [FABEM],**

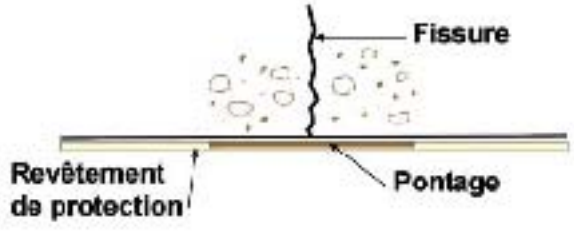


Figure n° 13 : principe de réalisation du pontage d'une fissure

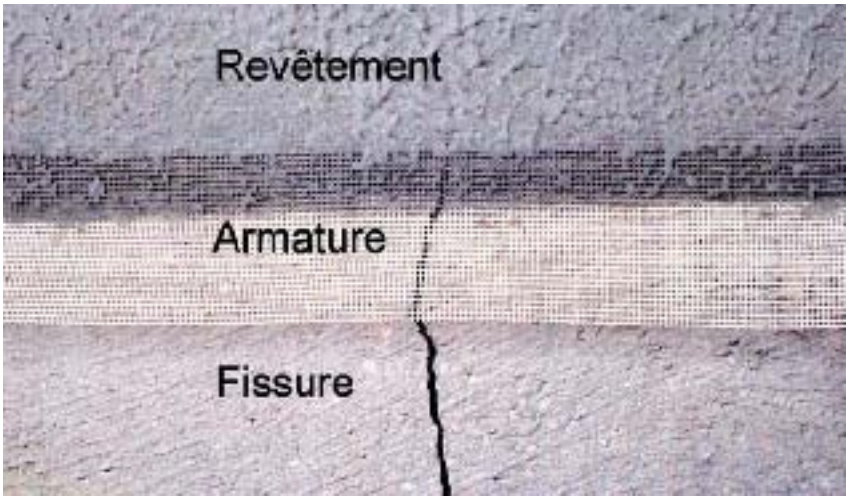


Photo n° 44 : pontage d'une fissure (crédit photo SIKA)

Certaines des réparations visées ci-dessus sont visibles. Si l'aspect de l'ouvrage en pâtit, **un revêtement esthétique ou de protection** doit être mis en œuvre. Si besoin est, il faut protéger la structure contre les effets des eaux (drainage).

b. si l'expertise a montré (par exemple, par un essai de chargement) que ces fissures perturbent le fonctionnement de l'ouvrage (insuffisance de capacité portante), l'opération de restauration du béton d'un élément, d'une partie ou de la totalité de la structure peut faire appel **aux méthodes de réparation développées dans la partie 3.2.6.2.5 ci-après** consacrée aux réparations **des désordres d'origine mécanique.** Si besoin est, il faut protéger ensuite la structure contre les effets des eaux (étanchéité et drainage).

Exemple de réparations :

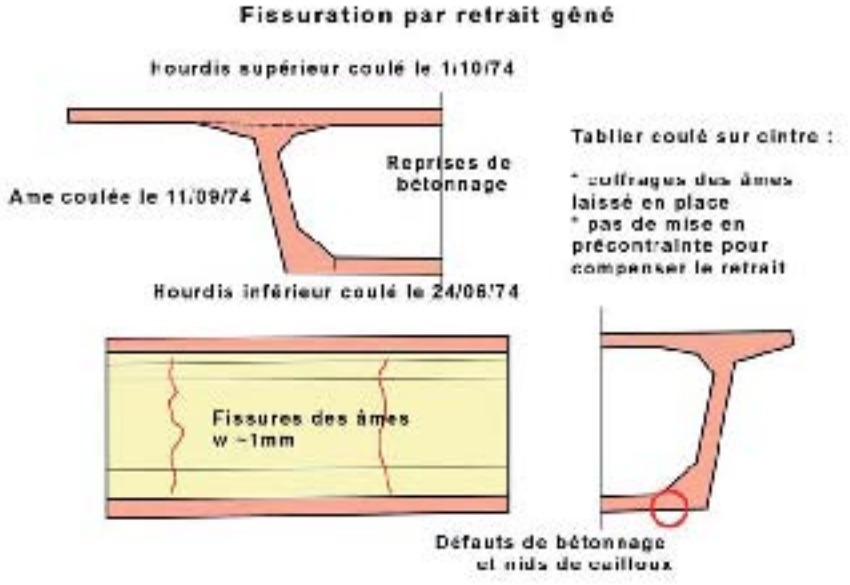


Figure n° 14 : fissuration d'une poutre-caisson sous les effets des retraits

- Injection des fissures (ouverture apparente de 1 à 2 mm) de retrait gêné dans les âmes d'une poutre-caisson en béton précontraint qui avait été réalisée en trois phases (le hourdis inférieur – les âmes inclinées – le hourdis supérieur) séparées de plusieurs mois et sans précautions particulières (renfort du ferraillage longitudinal ou mise en tension de quelques armatures de précontrainte). De plus, le coffrage avait été laissé en place. L'injection pour reconstituer la continuité de la matière a eu lieu juste avant la mise en tension des câbles de la précontrainte longitudinale qui n'avaient pas encore été tendus.

3.2.6.2.2.4 Les méthodes de réparation d'un béton dégradé par des effets thermiques (incendie...)

Les méthodes **de restauration du béton** d'un élément, d'une partie ou de la totalité d'une structure sont différentes suivant **l'importance des désordres constatés :**

1. Si les désordres sont superficiels et si les caractéristiques mécaniques des armatures n'ont pas été modifiées, l'opération de restauration du béton comprend :

- une préparation de surface avec l'élimination du béton dégradé par la chaleur (perte d'eau, décomposition des constituants du béton en fonction de la température atteinte) ;
- la reconstitution de la peau (enrobage des armatures) par un ragréage manuel ou mécanisé, voire par projection (produit de réparation, mortier ou béton) ;
- la mise en œuvre d'un revêtement de protection contre les effets du feu si l'expertise à montré que les risques de récidives sont élevés (d'autres solutions sont envisageables) ;
- si besoin est, la mise en œuvre d'un revêtement à caractère esthétique sur les surfaces traitées.

2. Si les désordres sont importants, l'opération de restauration du béton comprend :

- une préparation de surface comprenant l'élimination du béton dégradé par la chaleur (perte d'eau, décomposition des constituants du béton en fonction de la température atteinte) ; dans certains cas, il faut entièrement reconstituer l'élément ayant subit l'incendie ;
- le remplacement des armatures dont les caractéristiques mécaniques ont été modifiées par la chaleur ; le scellement d'armatures de couture dans les parties de béton conservées complète, en tant que de besoin, le ferraillage reconstitué ;
- la reconstitution de la géométrie de la pièce, voire avec des surépaisseurs par bétonnage en place, le béton ajouté devant être formulé pour mieux répondre aux risques de feu si l'expertise l'exige ; ce béton peut être mis en place classiquement par injection sous pression ou par projection ;
- la mise en charge des parties réparées, si besoin est ;
- la mise en œuvre d'un revêtement de protection contre les effets du feu si l'expertise à montré que les risques de récidives sont élevés (d'autres solutions sont envisageables) ;
- si besoin est, la mise en œuvre d'un revêtement à caractère esthétique sur les surfaces traitées.

Dans certains cas, la réparation doit faire appel aux méthodes de réparation structurales décrites dans l'article 3.2.6.2.5 ci-après.

3.2.6.2.2.5 Les méthodes de réparation d'un béton dégradé par usure et/ou érosion

Diverses structures peuvent être soumises à des phénomènes d'érosion. Il y a lieu de citer les dallages soumis aux effets du trafic, les déversoirs des barrages, les bajoyers d'écluses… soumis à l'action de l'eau, les structures aériennes soumises à l'érosion éolienne…

Nota : *les essais pour tester les produits sont décrits dans l'article 3.3 relatif au choix des produits.*

Les méthodes **de restauration du béton** d'un élément, d'une partie ou de la totalité d'une structure sont différentes suivant **l'importance des désordres constatés :**

1. Si les désordres sont superficiels et si les caractéristiques mécaniques des armatures n'ont pas été modifiées, l'opération de restauration du béton comprend :

- une préparation de surface avec l'élimination du béton dégradé par l'érosion ou l'usure ;
- la reconstitution de la peau (enrobage des armatures) par un ragréage manuel ou mécanisé, voire par projection avec un produits de réparation, mortier ou béton) ; la formulation du matériau de réparation doit être adaptée aux risques d'érosion ou d'usure ;
- la mise en œuvre d'un revêtement de protection contre l'érosion ou l'usure si l'expertise a montré que les risques d'érosion ou d'usure sont importants.

2. Si les désordres sont importants, l'opération de restauration du béton comprend :

- une préparation de surface avec l'élimination du béton dégradé par l'érosion ou l'usure ;
- le remplacement des armatures déformées. Le scellement d'armatures de couture dans les parties de béton conservées complète, en tant que de besoin, le ferraillage reconstitué. Des armatures supplémentaires sont éventuellement nécessaires ;
- la reconstitution de la géométrie de la pièce, voire avec des surépaisseurs par bétonnage en place, le béton ajouté devant être formulé pour mieux répondre aux risques d'érosion et d'usure si l'expertise l'exige ; ce béton peut être mis en place classiquement, par injection, sous pression ou par projection ;
- la mise en œuvre d'un revêtement de protection contre l'érosion ou l'usure si l'expertise à montré que les risques d'érosion ou d'usure sont importants. Le choix de tels revêtements relève, soit de la norme **NF EN 1504-2** pour les cas courants, soit d'une étude spécifique lorsque les agressions sont intenses (érosion hydraulique…). D'autres solutions sont envisageables, comme la réalisation d'un platelage d'usure métallique…

Exemple de réparations :

- Réparation du radier de la prise d'eau de la chute des Bois sous la mer de glace à Chamonix. Ce radier, fortement érodé par les eaux, a été renforcé par un béton à base d'agrégats métalliques (densité comprise entre 4,6 et 4,9) ayant une résistance à la compression comprise entre 160 et 220 MPa et une résistance à l'abrasion légèrement supérieure à celle du granit (15% de celle d'un béton normal)[26].

Photo n° 45 : érosion hydraulique du radier de la chute des Bois près de Chamonix - Procédé WEARGRIT (crédit photo Wheelabrator Allevard)

Photo n° 46 : réparation du radier de la chute des Bois près de Chamonix - Procédé WEARGRIT (crédit photo Wheelabrator Allevard)

[26] *Consulter la présentation sur le site Le Pont.*

3.2.6.2.3 Les méthodes de réparation à mettre en œuvre en cas de désordres d'origine chimique

Les différentes méthodes envisageables dans les divers cas de désordres d'origine chimique sont résumées sur le tableau suivant (y compris celles qui ne sont pas développées dans le présent guide et qui sont indiquées en italiques) :

ATTENTION, *les informations contenues dans ces tableaux sont à appliquer avec* ***«précautions». Il est rappelé que le présent guide n'a pas pour but de se substituer au concepteur de la réparation*** *qui a pour rôle de mettre au point le projet en faisant la synthèse de toutes les exigences à satisfaire.*

Méthodes de réparation et de protection	Béton dégradé par des causes chimiques								
	Eaux pures		Eaux acides		Eaux alcalines	Eaux chargées en sels	Eaux de mer	Attaques biochimiques	
Cas à considérer	**1**	**2**	**1**	**2**	**/**	**/**	**/**	**1**	**2**
La restauration du béton par :									
■ ragréage	O		O						O (1)
■ bétonnage		O=		O=					
Le renforcement structural par :									
■ ajout de béton		O=		O=					
■ *ajout d'armatures passives intérieures (G7 [FABEM])*		S		S					
Le traitement des vides du béton par :									
■ *injection rigide ou souple (G3 [FABEM]) et/ou (F6 [FABEM])*		S (1)			Voir le cas des eaux acides	Voir le cas des eaux acides	Voir le cas des eaux acides		
La protection des bétons par :									
■ *revêtement (G4 [FABEM])*	O	O=	O	O=				O	O (1)
■ *chapes d'étanchéité (G1 [FAEC])...*		O=		O=					
■ Produit biocide								O	O (2)
La protection contre l'eau par :									
■ *dispositif de drainage...*	S	S	S	S				S	S
La régénération de la passivation	S (si besoin est)								

Tableau n° 8 : méthodes de réparation des désordres d'origine chimique

Légende :
- ***1*** *cas des désordres peu importants*
- ***2*** *cas des désordres importants*
- ***3*** *cas des désordres imposant le remplacement de tout ou partie de l'ouvrage (pour mémoire)*
- ***O*** *réparation à retenir*
- ***O=*** *réparations pouvant satisfaire le même objectif (utiliser l'une ou l'autre)*
- ***S*** *si besoin est*
- ***(1)*** *produit d'injection rigide pour reconstituer la continuité du matériau béton*
- ***(2)*** *si un biocide est intégré au produit de réparation et si la totalité de la surface de la structure est réparée, le revêtement de protection est inutile*

Nota : *les méthodes de réparations décrites ci-après comportent* ***la mise en œuvre d'un revêtement de protection.*** *Or, théoriquement, d'après le* ***FD P 18-011,*** *lorsque le niveau d'agressivité est faible, voire moyen ou fort, la qualité du béton d'enrobage, un ciment adapté et l'importance de l'enrobage suffisent à s'affranchir d'un revêtement de protection.* ***Ce revêtement s'avère ici normalement nécessaire*** *parce qu'il y a eu attaque et que les parties de la peau du béton non ragrées restent potentiellement attaquables.*
Si la totalité du béton de surface est remplacé *par un béton ou un produit de réparation capable de résister à l'attaque chimique,* ***le revêtement peut être supprimé,*** *sauf s'il y a un risque, par retrait différentiel, de fissuration de cette couche restaurée.*

Bien entendu, dans certains cas, lorsque les désordres sont trop importants, la solution «3» de démolition-reconstruction s'impose.

3.2.6.2.3.1 Les différentes solutions de réparation d'un béton dégradé par les eaux pures, voire faiblement acides

> Les méthodes de restauration du béton d'un élément, d'une partie ou de la totalité d'une structure sont différentes suivant l'importance des désordres constatés :

1. **Si les désordres sont superficiels** (intervention dès l'apparition des premiers désordres dus à dissolution des éléments calciques uniquement au niveau de la peau du béton), l'opération **de restauration du béton** comprend :

- une préparation de surface avec éventuellement l'élimination du béton dégradé ;
- la reconstitution, si nécessaire, de la peau (enrobage des armatures) par un ragréage manuel ou mécanisé, voire par projection (produit de réparation, mortier ou béton) ;
- la mise en œuvre obligatoire d'un revêtement de protection pour éviter le retour des désordres sur toutes les surfaces concernées par le phénomène ;
- la protection obligatoire de la structure réparée contre les effets des eaux.

2. **Si les désordres sont importants** (intervention tardive), l'opération **de restauration du béton** comprend :

- le captage des eaux à l'origine des dégradations (par exemple, par un drainage) si l'expertise en a montré la nécessité ;
- une injection des vides provoqués dans le corps de la pièce par les circulations d'eau qui provoquent la dissolution des éléments calciques, sous réserve que l'expertise ait permis de mesurer la porosité du béton et la possibilité de communications entre les vides ;
- une préparation de surface avec l'élimination du béton dégradé ;
- si besoin est, le scellement d'armatures de couture dans le béton conservé et l'ajout d'armatures supplémentaires ;
- la reconstitution de la géométrie de la pièce, voire avec des surépaisseurs (pour augmenter l'enrobage des armatures) par bétonnage en place classiquement ou par injection sous pression ou par projection ;
- la mise en œuvre obligatoire d'un revêtement de protection (enduit, chape d'étanchéité, revêtement d'étanchéité…) sur toutes les surfaces concernées par le phénomène, de façon à éviter le retour des désordres ;
- la protection obligatoire de la structure réparée contre les effets des eaux.

Exemples de réparations :

- la restauration d'un des massifs de fondation de l'arc du pont de la Caille endommagé par les effets du gel à cause d'un béton gélif imbibé d'eau par les précipitations atmosphériques et les circulations d'eau dans le sol :
  - une étude a été menée d'une part, pour déterminer la porosité du béton (prélèvement de carottes) et, d'autre part, pour s'assurer que les vides internes étaient communicants, donc injectables (utilisation de traceurs radioactifs) ;

- la protection contre les eaux atmosphériques a été assurée par la réalisation d'une couverture en béton armé (voir la photo),
- les eaux du sol ont été captées par un système de drains subhorizontaux forés,
- les vides à l'intérieur du massif ont été injectés par un coulis de ciment...

Photo n° 47 : un des deux massif de fondation du pont de la Caille avant travaux (crédit photo DDE 74)

Photo n° 48 : travaux en cours sur un des deux massif de fondation du pont de la Caille (crédit photo DDE 74)

3.2.6.2.3.2 Les différentes solutions de réparation d'un béton dégradé par les eaux acides (niveau d'agressivité de moyen à très fort)

Les méthodes **de restauration du béton** d'un élément, d'une partie ou de la totalité d'une structure sont différentes suivant **l'importance des désordres constatés :**

1. **Si les désordres sont superficiels** (intervention dès l'apparition des premiers désordres dus à dissolution des éléments calciques uniquement au niveau de la peau du béton), l'opération **de restauration du béton** comprend :

- une préparation de surface avec l'élimination du béton dégradé suivie d'un lavage pour enlever les traces d'acidité ;
- la reconstitution, si nécessaire, de la peau (enrobage des armatures) par un ragréage manuel ou mécanisé, voire par projection (l'enrobage des armatures est à majorer, si nécessaire (cf. le fascicule de documentation **FD P 18-011) ;**
- la mise en œuvre obligatoire d'un revêtement de protection pour éviter le retour des désordres sur toutes les surfaces concernées par le phénomène ;
- la protection obligatoire de la structure réparée contre les effets des eaux acides.

Le choix du produit de réparation doit être adapté au niveau d'agressivité des eaux acides (par exemple, choix du ciment, des granulats (pas de granulats calcaires…).

2. **Si les désordres sont importants** (intervention tardive), l'opération **de restauration du béton** comprend :

- le captage des eaux à l'origine des dégradations (par exemple, par un drainage), si l'expertise en a montré la nécessité ;
- l'élimination de la totalité du béton dégradé, y compris en profondeur, et l'élimination par lavage des traces d'acidité ;
- si besoin est, le scellement d'armatures de couture dans le béton conservé et l'ajout d'armatures supplémentaires ;
- la reconstitution de la géométrie de la pièce, voire avec des surépaisseurs (pour augmenter l'enrobage des armatures) par bétonnage en place classiquement ou par injection sous pression ou par projection ;
- la mise en œuvre obligatoire d'un revêtement de protection (enduit, chape d'étanchéité, revêtement d'étanchéité…) sur toutes les surfaces concernées par le phénomène de façon à éviter le retour des désordres ;
- la protection obligatoire de la structure réparée contre les effets des eaux acides.

Remarque : *en cas d'attaque sévère, il y a également attaque des armatures avec un développement de la corrosion. Se reporter à l'article 3.2.6.3 ci-après.*

3.2.6.2.3.3 Les différentes solutions de réparation d'un béton dégradé par les eaux alcalines (basiques)

> Un béton classique à base de ciment Portland résistant aux eaux alcalines, les seuls cas de réparation concernent :

- les bétons de structure à base de ciment alumineux qui perd toute résistance au contact des eaux basiques. Les méthodes de réparation applicables décrites en cas d'attaques acides peuvent être reprises sous réserve que les produits de réparation soient formulés pour résister à ces eaux basiques et soient compatibles avec le béton à base de ciment alumineux ;

- les bétons à base de ciment Portland qui présentent des efflorescences importantes (lorsqu'une face de la pièce est en contact permanent avec des eaux alcalines) ; là encore, les méthodes de réparation applicables en cas d'attaques acides sont utilisables.

Il est rappelé qu'un excès d'alcalins peut déclencher des RGI. Les méthodes de réparation actuellement envisageables sont présentées à l'article 3.2.3.3.7 ci-après.

3.2.6.2.3.4 Les différentes solutions de réparation d'un béton dégradé par les eaux ou des sols contenant certains des sels dissous (sulfates, chlorures, nitrates, sulfures...)

Les méthodes de réparation décrites dans le cas des attaques acides sont applicables aux attaques des solutions salines. Bien entendu, le béton doit être nettoyé pour éliminer les agents agressifs et le béton ou le produit de réparation doivent être formulés pour résister aux agents agressifs en cause.

S'il y a lieu, la corrosion des armatures est à traiter. Se reporter à l'article 3.2.6.3 ci-après.

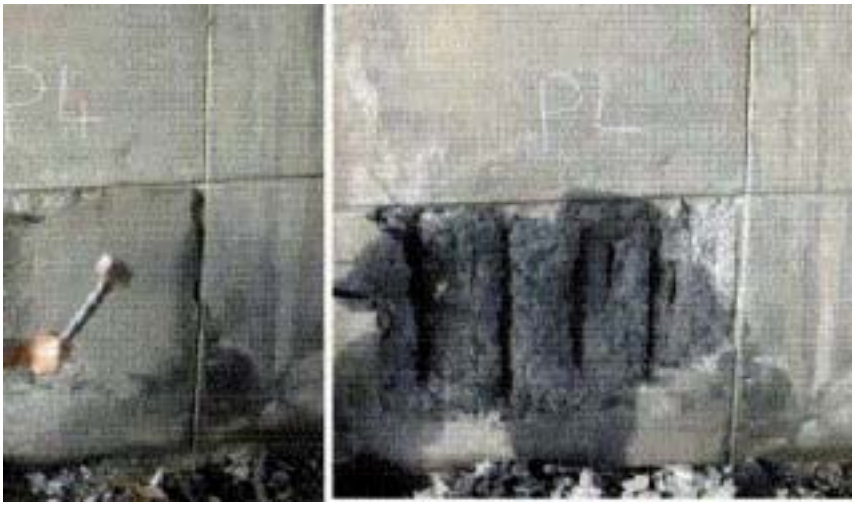


Photo n° 49 : attaque du béton par des eaux agressives (crédit photo Freyssinet)

3.2.6.2.3.5 Les différentes solutions de réparation d'un béton dégradé par l'eau de mer

Les attaques par l'eau de mer concernent surtout les parties exposées au marnage et projection et les deux principaux agents agressifs sont les sulfates et les chlorures. Les méthodes de réparation pour traiter des agressions des eaux contenant certains sels dissous et décrites dans l'article sont applicables aux attaques dues à l'eau de mer.

Comme il y a présence de chlorures, il y a lieu de traiter aussi la corrosion des armatures. Se reporter à l'article 3.2.6.3 ci-après.

Aux attaques par l'eau de mer peuvent être associées les effets du gel et des attaques biologiques. Se reporter aux articles 3.2.6.2.2 et 3.2.6.2.3 du présent guide.

3.2.6.2.3.6 Les différentes solutions de réparation d'un béton dégradé par des attaques biochimiques

> Cas des attaques sulfo-bactériennes :

Ce cas relève des méthodes de réparation des bétons soumis à des attaques acides et sulfatiques développées dans l'article 3.2.6.2.3 ci-devant.

> Cas des attaques dues à l'activité des moisissures, mousses, algues... :

Les méthodes **de restauration du béton** d'un élément, d'une partie ou de la totalité d'une structure sont différentes suivant **l'importance des désordres constatés :**

1. **Si les désordres sont superficiels** (intervention dès l'apparition des premiers désordres au niveau de la peau du béton), l'opération de **restauration du béton** comprend :

- une préparation de surface avec l'enlèvement des dépôts de mousses, algues, moisissures par brossage et lavage à l'eau sous pression ;
- la mise en œuvre d'un produit biocide pour éliminer les agents biologiques, suivie quelques heures après d'un lavage soigné ;
- la mise en œuvre d'un produit protecteur contre les agents biologiques, qui devra être renouvelé périodiquement pour assurer une protection de longue durée ;
- la protection obligatoire de la structure réparée contre les effets des eaux.

2. **Si les désordres sont plus importants** (intervention tardive), l'opération **de restauration du béton** comprend :

- une préparation de surface avec l'enlèvement des dépôts de mousses, algues, moisissures par brossage et lavage à l'eau sous pression ;
- la mise en œuvre d'un produit biocide pour éliminer les agents biologiques, suivie quelques heures après d'un lavage soigné ;
- l'élimination de la totalité du béton dégradé ;
- la reconstitution de la géométrie de la pièce par ragréage manuel ou mécanisé (le mortier de ragréage peut être traité dans la masse par un produit biocide. Si la totalité de la surface est traitée, un revêtement de protection n'est pas nécessaire) ;
- la mise en œuvre d'un revêtement de protection ou d'aspect si besoin est ;
- la mise en œuvre d'un produit protecteur (contre les agents biologiques), qui devra être renouvelé périodiquement pour assurer une protection de longue durée.
- la protection obligatoire de la structure réparée contre les effets des eaux.

3.2.6.2.4 Les méthodes de réparation à mettre en œuvre en cas de désordres dus à des réactions de gonflement interne (RGI)

ATTENTION, *dans* ***une RGI, tant que les produits nécessaires à la réaction*** *sont présents au cœur du béton (eau libre, chaux, sulfates…),* ***la réaction de gonflement se poursuit.*** *À ce jour,* ***il n'existe pas de technique de réparation qui permette de stopper ce processus.*** *Parmi les méthodes utilisées jusqu'à présent, certaines sont inefficaces mais d'autres permettent de prolonger plus ou moins longtemps la vie des ouvrages malades (les réparations étant relativement récentes, leur efficacité à long terme est inconnue sauf, bien entendu, la solution ultime qui est la démolition-reconstruction).*

Les différentes méthodes envisageables dans les cas de désordres dus à des réactions de gonflement interne sont résumées sur le tableau suivant (y compris celles qui ne sont pas développées par le présent guide et qui sont indiquées en italiques). **Ces méthodes de réparation avec leur niveau d'efficacité sont extraites du guide méthodologique de 2003 du LCPC** d'aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne auquel il est indispensable de se référer avant d'entreprendre la moindre action sur un ouvrage touché par une telle pathologie. De plus, le conseil de spécialistes est indispensable, compte tenu de la complexité de l'expertise et de la difficulté de la mise au point des solutions de réparation.

Méthodes de réparation	Efficacité	Observations
Pontage ou injection des fissures (G2 [FABEM]) ou (G3 [FABEM])	0	Cette technique n'empêche pas les échanges hydriques avec l'extérieur.
Peinture film de 200 à 300 µm au maximum (G4 [FABEM])	0	Cette technique n'empêche pas les échanges hydriques avec l'extérieur.
Revêtement étanche à l'eau et à la vapeur d'eau (G4 [FABEM])	+	Le revêtement réduit les échanges hydriques, donc la quantité d'eau disponible pour la réaction.
Réalisation d'un frettage de la pièce par : des méthodes de réparation applicables aux désordres d'origine mécanique, traitées ci-après ou dans d'autres guides de la série. Il faut, de plus, réduire les échanges hydriques.		
1. Enrobage de la structure par un voile en béton armé formant une sorte de sarcophage (G1 [FABEM]) et (G7 [FABEM])	++	■ d'une part, les armatures du voile reprennent une partie des efforts d'expansion ce qui soulage d'autant les armatures de la structure ; ■ d'autre part, les échanges hydriques avec l'extérieur sont ralentis par le voile.
2. Mise en œuvre d'armatures extérieures au béton par collage de composites (fibres de verre ou de carbone) (G4 [FABEM]) (G7 [FABEM]).	++	■ d'une part, les armatures extérieures reprennent une partie des efforts d'expansion ce qui soulage d'autant les armatures de la structure ; ■ d'autre part, les échanges hydriques avec l'extérieur sont ralentis par l'armature (si la pièce est totalement enrobée sinon prévoir un revêtement d'étanchéité).
3 Création d'une précontrainte, si possible, tridimensionnelle : contrainte de 3 à 10 MPa suivant l'importance de l'expansion résiduelle estimée lors de l'expertise (G4 [FABEM]) et (G8 [FABEM])	++⁺	L'étreinte triaxiale empêche l'expansion (si l'étreinte n'est que bidi-rectionnelle l'expansion dans le sens non précontraint n'est pas bloquée). Réparation à combiner ou non avec un voile en béton ou un revêtement d'étanchéité.
Création d'un joint : (la libération des contraintes par sciage fait partie des méthodes de réparation des désordres d'origine mécanique)	++	Applicable à certaines structures (par exemple, les barrages poids). Réparation à combiner avec le calfeutrement des coupures, un revêtement d'étanchéité…
Démolition-reconstruction	**Efficacité totale**	Solution de type «3» coûteuse mais qui, parfois, s'impose.

Tableau n° 9 : méthodes de réparation des désordres dus à des RGI

Légende :
0 traitement inefficace
+ traitement permettant de prolonger la vie de l'ouvrage (cas d'un ouvrage endommagé mais évoluant peu) ou en combinaison avec des méthodes listées dans la suite du tableau
++ traitement qui peut être efficace mais seulement à moyen terme (+++ seule la précontrainte tridimensionnelle semble en mesure de confiner la réaction)

> Les traitements des désordres dus aux réactions de gonflement interne, faute d'un recul suffisant, restent, à ce jour, du domaine expérimental. Il n'a donc pas été jugé utile de les décrire par le détail dans le présent document (se reporter au guide méthodologique de 2003 du LCPC).

Exemples d'une réparation et d'une démolition-reconstruction :

Photo n° 50 : importance de la fissuration (crédit photo Freyssinet)

Photo n° 51 : ceinturage des pylônes par des bandes de tissus composite (crédit photo Freyssinet)

- la réparation provisoire, en attendant la construction d'un nouvel ouvrage (pont à haubans courbe), des pylônes du pont suspendu de Térénez dans le Finistère affectés par une alcali-réaction provoquant leur fissuration dans le sens vertical à cause des effets du gonflement transversal (dans le plan horizontal la forte compression empêchant le développement des fissures horizontales).

La réparation a été effectuée par ceinturage des mâts des pylônes par des tissus composites à base de fibre de carbone et par une ceinture précontrainte de la base des pylônes.

Photo n° 52 : ceinturage de la base des pylônes en cours de bétonnage par projection (crédit photo Freyssinet)

Photo n° 53 : détail du ceinturage (crédit photo Freyssinet)

- le remplacement du chevêtre du pont de Fozières sur la RN 9 atteint par une réaction sulfatique interne.

Le tablier a été mis sur des appuis provisoires, le chevêtre a été découpé et enfin, un nouveau chevêtre a été réalisé par bétonnage en place.

Photo n° 54 : fissure multidirectionnelle localisée sur la face verticale, aux extrémités, d'un chevêtre d'un pont atteint de réaction sulfatique interne (crédit photo LCPC)

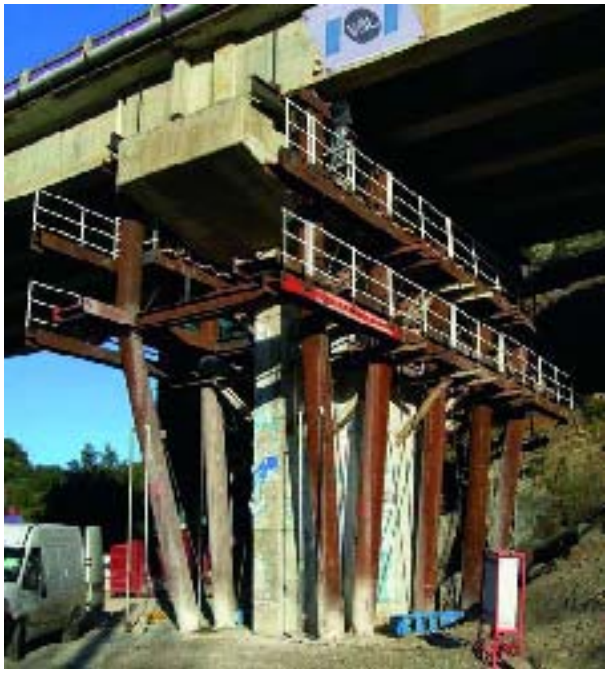


Photo n° 55 : étaiement des deux travées reposant sur le chevêtre (crédit photo VSL France)

Photo n° 56 : mise en place du ferraillage du nouveau chevêtre (crédit photo VSL France)

3.2.6.2.5 Les méthodes de réparation ou de renforcement à mettre en œuvre en cas de désordres ou d'insuffisances d'origine mécanique

3.2.6.2.5.1 Généralités

L'importance des réparations doit être adaptée **à la structure concernée** (bâtiment, pont, réservoir…), au matériau constitutif de la structure (béton armé ou béton précontraint) et, enfin, **à l'importance des désordres,** qui vont de la simple épaufrure à l'effondrement partiel ou total de la structure.

Il n'est donc pas possible de décrire toutes les solutions de réparation pour chaque type de structure ; aussi, dans la suite de l'article, seront décrits **les principaux types de réparation** et essentiellement ceux liés à la restauration du béton en surface comme en profondeur, en mettant bien en évidence les réparations permettant de traiter les cas où la capacité portante de la structure est mise en cause et les cas où elle ne l'est pas.

On remarquera ici que les méthodes de réparation relatives aux désordres d'origine mécanique ont été liées aux manifestations des désordres (fissures, déformations …) et non aux causes de ceux–ci, qui peuvent être multiples.

Aux désordres d'origine mécanique peuvent se superposer **des désordres ou des risques de désordres d'autres origines** (par exemple, les effets du gel…) et surtout ceux dus **à la corrosion des armatures.** Le choix des méthodes de réparations à utiliser doit donc faire la synthèse entre les méthodes développées dans le présent article et celles développées dans les articles 3.2.6.2 ci-devant et 3.2.6.3 ci-après.

Les méthodes de réparation décrites ci-après peuvent, avec quelques adaptations, être utilisées **pour le renforcement des structures,** comme cela est explicité à la fin de cet article dans la partie 3.2.6.2.5.4.

Les différentes méthodes envisageables dans les cas **de désordres d'origine mécanique** sont résumées sur les deux tableaux suivants (y compris celles qui ne sont pas développées dans le présent guide et qui sont indiquées en italiques). Dans ce tableau, **les méthodes de réparation ont été associées aux désordres et non aux causes des désordres comme dans les tableaux précédents.**

ATTENTION, *les informations contenues dans ces tableaux sont à appliquer avec* ***«précautions». Il est rappelé que le présent guide n'a pas pour but de se substituer au concepteur de la réparation*** *qui a pour rôle de mettre au point le projet en faisant la synthèse de toutes les exigences à satisfaire.*

> Ces méthodes de réparation sont à associer, si nécessaire, à une démolition partielle de certaines parties de la structure à réparer ou à renforcer. Par exemple :

- pour accéder à l'intérieur de la structure et y amener le matériel nécessaire aux travaux (cas d'une poutre-caisson aux accès étriqués…) ;
- lorsque les parties les plus désorganisées sont irréparables (cas d'un choc…) ;
- pour réaliser et lier des parties nouvelles à la structure existante (cas d'un élargissement…)…

Bien entendu, dans certains cas, lorsque les désordres sont trop importants, la solution de démolition-reconstruction s'impose.

> Les différentes méthodes de réparation peuvent se rattacher aux familles suivantes :

Famille	Types de réparation
Restauration ou reconstitution du béton en surface	Ragréage manuel ou mécanisé
	Projection de mortier ou béton (G5 [FABEM])
Restauration ou reconstitution du cœur du béton	Bétonnage en place ou sous pression
	Projection de béton (G5 [FABEM])
	Injection (fissures ou béton) (G3 [FABEM])
Renforcement par ajout de béton	Bétonnage en place ou sous pression
	Projection de béton (G5 [FABEM])
	Béton contrecollé
Renforcement par ajout d'armatures passives intérieures au béton	Pose de nouvelles armatures (mise en place classique)
	Scellement d'armatures (G7 [FABEM])
Renforcement par ajout d'armatures passives extérieures béton	*Tôles collées (G7 [FABEM])*
	Composites (tissus en fibres de verre ou de carbone et pultrudés) (G7 [FABEM])
Renforcement par ajout de forces	*Déformations imposées (dénivellation d'appui, réglage de poussée…) (G8 [FABEM])*
	Précontrainte intérieure ou extérieure au béton (G8 [FABEM])
Protection (si besoin est)	*Revêtement de protection et/ou d'aspect (G4 [FABEM])*

Tableau n° 10 : familles de réparations

> Les méthodes de réparation à appliquer en fonction des désordres constatés et ayant pour conséquences des désordres structuraux ou non sont données par le tableau suivant :

Nature des désordres / Méthodes possibles	Fissures			Épaufrures, cavités…				
Incidences structurales (St) ou non-structurales (NSt)	NSt	St	St	NSt	NSt	St	St	St
Structure en BA ou en BP	/	BA	BP ou BA	/	/	BA	BA ou BP	BP
Autres informations	/	/	/	Morceaux intacts	Morceaux cassés	Externes	Internes	Externes
Collage de béton :								
■ béton durci sur béton durci				O				
■ béton frais sur béton durci				/				
Restauration du béton par :								
■ ragréage					O			
■ bétonnage						O		O
■ injection							O	
Renforcement structural par :								
■ ajout de béton								
■ ajout d'armatures passives intérieures					S	S		S
■ ajout d'armatures passives extérieures		O				S		
■ ajout d'armatures actives intérieures ou extérieures			O					O
Traitement des fissures par :								
■ injection rigide ou souple	Ou (2)	O (1)	O (1)			O (1)		O (1)
■ calfeutrement	Ou							
■ pontage	Ou							
■ revêtement armé ou non local ou général	Ou=							
■ création d'un joint	S	S	S	/	/	/	/	/
Protection des bétons par :								
■ revêtement généralisé	O=			O S	O	O		O

Tableau n° 11 : méthodes de réparation des désordres d'origine mécanique

Légende :
O : *réparation à retenir*
Ou : *plusieurs méthodes de réparation peuvent s'appliquer, un choix est nécessaire*
O= : *réparations pouvant satisfaire le même objectif (utiliser l'une ou l'autre)*
S : *si besoin est*
(1) : *produit d'injection rigide pour reconstituer la continuité du matériau béton*
(2) : *produit d'injection souple pour boucher les fissures*

3.2.6.2.5.2 Les différentes solutions de réparation d'un béton dégradé par des actions de faible importance entraînant des désordres qui ne mettent pas en cause la capacité portante de la structure

Il s'agit d'actions telles que des chocs de faible importance, des variations dimensionnelles gênées... qui peuvent provoquer des épaufrures, des petites fissures. Le but des réparations est de reconstituer la géométrie de la pièce et d'empêcher la pénétration des agents agressifs.

1. Cas des épaufrures :

- **premier cas,** si le morceau de béton éjecté est intact et si les armatures ne sont pas apparentes, un simple collage avec un produit de collage spécifique «béton durci sur béton durci» est parfaitement adapté ;
- **deuxième cas,** si le morceau de béton éjecté est détruit, il faut s'orienter vers un ragréage qui comporte :
  - une préparation de surface pour éliminer les restes de béton dégradé,
  - si besoin est, le scellement d'armatures de couture dans le béton conservé et la mise en place de nouvelles armatures,
  - la reconstitution de la géométrie de la pièce par un ragréage manuel ou mécanisé à l'aide d'un produit de réparation ou un mortier ;
- **dans le premier cas,** la réparation peut être complétée par la mise en œuvre d'un revêtement de protection ou d'aspect. Dans le second cas, le revêtement de protection est nécessaire

2. Cas des fissures :

- plusieurs solutions de traitement des fissures sont envisageables :
  - l'injection des fissures par un produit souple qui peut s'adapter au souffle des fissures sous les variations thermiques et hygrométriques journalières et saisonnières ou rigide pour assurer la continuité de la matière (se reporter à la norme **NF EN 1504-5** et au **GUIDE N°3 [FABEM]**),
  - le calfeutrement ou le pontage des fissures qui jouent le même rôle que l'injection souple. (se reporter au **GUIDE N°2 [FABEM]**),
  - la mise en place d'un revêtement de protection capable de ponter (avec ou sans armature) le souffle des fissures (se reporter au **GUIDE N°2 [FABEM]** ou au **GUIDE N°4 FABEM]**),

Dans le cas où la continuité du matériau doit absolument être rétablie, l'injection avec un produit d'injection devenant rigide après polymérisation s'impose. **La création d'un joint de dilatation** est aussi envisageable.

3.2.6.2.5.3 Les différentes solutions de réparation d'un béton dégradé par des actions générant des désordres mettant en cause la capacité portante de la structure

Il s'agit, d'une part, d'actions telles que des chocs importants, des variations dimensionnelles gênées, des tassements d'appui, des excès de charges… et, d'autre part, des erreurs de conception ou de réalisation… qui peuvent provoquer des fissures, des éclatements du béton, des déformations….

ATTENTION, une structure peut présenter tous ces désordres à la fois !

Le but des réparations est alors de reconstituer la géométrie et la capacité portante de l'élément désorganisé, voire de la totalité de la structure, et aussi d'empêcher la pénétration des agents agressifs dans les parties reconstituées et/ou restées intactes, tout en sauvegardant l'aspect de l'ouvrage si cela est possible.

L'opération de réparation peut imposer la mise sur cintre de la structure si la réparation doit équilibrer à la fois les charges permanentes et d'exploitation, mais une dénivellation d'appui ou le réglage de la poussée d'un arc…peuvent jouer le même rôle. Le choix est fonction des mesures effectuées in situ sur l'ouvrage et des résultats de calculs sur la répartition des contraintes dans la structure lors de l'expertise et de l'étude du projet de réparation.

1. Cas des épaufrures, des cavités, des trous…

■ Première solution de réparation des épaufrures, cavités et trous… sans ajout de force :

Elle est applicable aux structures en béton armé, voire à certaines parties de structures en béton précontraint mais dont le fonctionnement est celui d'une pièce en béton armé. Elle comporte :

- la mise en place d'un cintre, si nécessaire, suivie d'un réglage de la géométrie souhaitée, par exemple par vérinage (en cas de déformations excessives, de rupture partielle),
- la démolition du béton endommagé suivie d'une préparation de surface,
- si besoin est, le scellement d'armatures de couture dans le béton conservé et la mise en place d'armatures supplémentaires (avec recouvrements ou soudures),
- la reconstitution de la géométrie de la pièce, le béton pouvant être mis en place classiquement ou par injection sous pression ou par projection,
- la réalisation d'une injection périphérique pour améliorer le collage,
- la mise en place d'armatures extérieures passives si un renforcement s'avère nécessaire,
- si besoin est, la mise en charge de la structure réparée (enlèvement du cintre…),
- la mise en œuvre d'un revêtement d'aspect et/ou de protection ;

■ Adaptations possibles de la première solution :

- dans le cas où la cavité est interne au béton (par exemple, défaut de bétonnage), le remplissage de la cavité se fait par injection au moyen d'un coulis de ciment ou à l'aide d'un produit d'injection,

- dans le cas où il faut réduire au maximum les effets du retrait (par exemple, réfection d'un dé d'appui au-dessous ou au-dessus d'un appareil d'appui), il faut utiliser un mortier à retrait compensé qui peut être injecté ;

Remarque : ***l'utilisation des mortiers à retrait compensé,*** *voire fibrés est également intéressante pour limiter au maximum la fissuration à l'interface entre l'ancien et le nouveau béton, ce qui assure une meilleure répartition des contraintes au droit de la zone réparée.*

Exemple de réparation :

- Lors des travaux de réparation des fondations de piles du pont d'Œuilly (remplacement des palplanches en bois par des palplanches métalliques), une des piles a tassé de 15 centimètres, entraînant une rupture partielle des poutres du tablier et de leur dalle de couverture[27].

Après mise du tablier sur des palées provisoire, la zone de béton désorganisée a été démolie puis, par vérinage, le tablier a été repositionné en altitude. Ensuite, après mise en place des armatures nécessaires, un béton a été coulé pour reconstituer la géométrie de la zone démolie (poutres et hourdis). Enfin, la chape d'étanchéité a été réparée ainsi que les super-structures et les équipements endommagés.

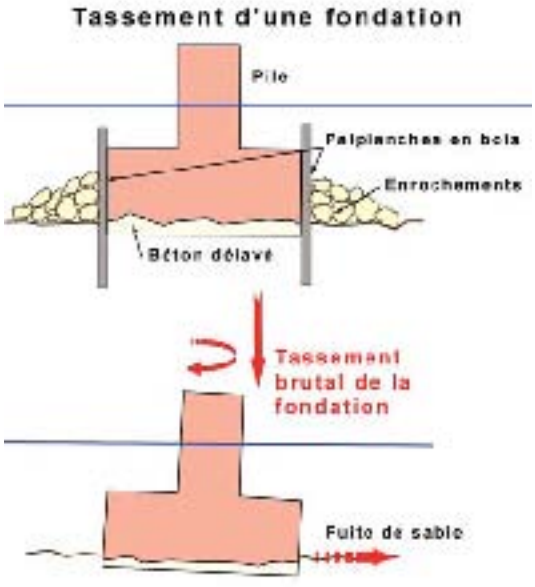


Figure n° 15 : cause du tassement de la pile du pont d'Œuilly

[27] *Cette rupture aurait pu être évitée par une reconnaissance préalable de l'état des fondations, laquelle aurait permis de révéler la présence d'une couche de sable à la base de la fondation (délavage du béton de chaux de la semelle de fondation lors de son coulage au 19e siècle).*

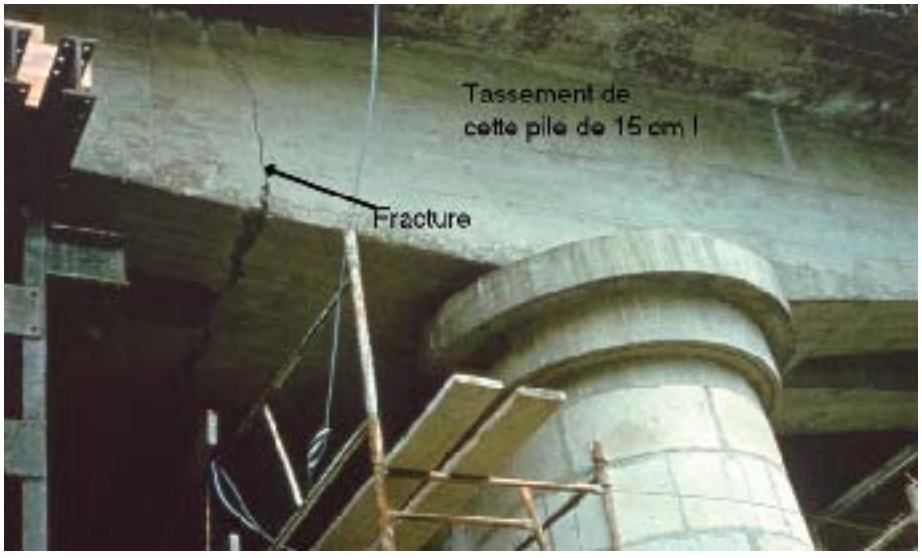


Photo n° 57 : rupture d'une des poutres en béton armé du pont d'Œuilly (crédit photo D. Poineau)

■ **Seconde solution de réparation des épaufrures, cavités et trous... avec ajout de force :**

Elle est applicable aux structures en béton précontraint et parfois aux structures en béton armé (cas où un ajout de force est nécessaire). Elle comporte :

- la démolition du béton endommagé suivi d'une préparation de surface,
- si besoin est, le scellement d'armatures de couture dans le béton conservé et la mise en place d'armatures supplémentaires (avec recouvrements ou soudures),
- la reconstitution de la géométrie de la pièce, le béton pouvant être mis en place classiquement ou par injection sous pression ou par projection,
- l'injection périphérique pour améliorer le collage,
- la mise en charge de la structure réparée par ajout de forces (normalement, par précontrainte, voire dénivellation d'appui),
- la mise en œuvre d'un revêtement d'aspect et/ou de protection.

Remarques : *la mise sur cintre d'un pont en béton précontraint peut être envisagée, par exemple, lors d'une opération de remplacement de câbles. La mise en place d'une précontrainte extérieure provisoire est également envisageable.*

Les mortiers à retrait compensé, voire fibrés peuvent aussi être utilisés pour les réparations des structures précontraintes.

Exemple de réparation :

- Lors de la construction par encorbellements successifs du pont de Montereau, au moment de la mise en tension des câbles de continuité de la travée centrale disposés dans les goussets du hourdis inférieur, le béton en plusieurs endroit du hourdis a été littéralement désorganisé sous la poussée au vide exercée par ces câbles de forte puissance (19 T15)[28].

Les câbles tendus ont été détendus, le béton désorganisé a été démoli, les armatures passives déformées ont été enlevées, il a été de même pour les gaines des câbles écrasées. Ensuite, de nouvelles gaines et de nouvelles armatures passives ont positionnées. Enfin, après mise en place d'un coffrage étanche, le béton a été reconstitué par injection d'un mortier à retrait compensé.

Photo n° 58 : désordres du hourdis inférieur dus à une poussée au vide locale (crédit photo D. Poineau)

[28] Les gaines des câbles avaient été seulement ligaturées sur le ferraillage avec le fil de fer recuit utilisé pour attacher les armatures de béton armé. Normalement, elles auraient dû être fixées sur des armatures support spécifiques qui sont imposées par les règles d'exécution du BP et qui figuraient d'ailleurs sur les plans d'exécution.

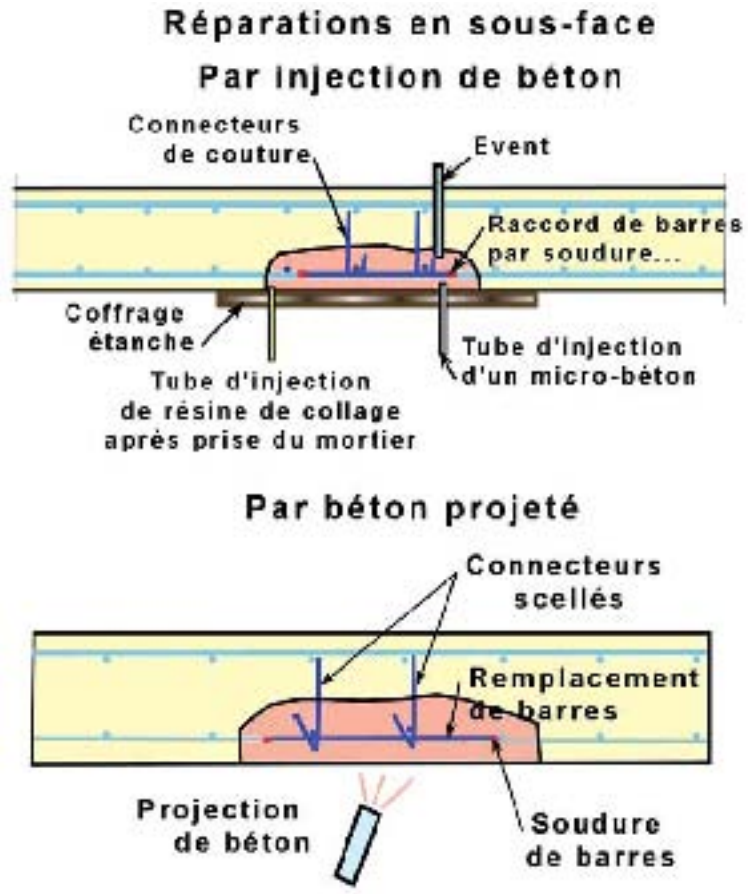


Figure n° 16 : principes de réparation d'un hourdis inférieur par injection de béton ou par béton projeté

2. Cas des fissures de flexion, d'effort tranchant, de torsion...

■ Première solution de réparation des fissures sans ajout de force :

Elle est applicable aux structures en béton armé. Elle comporte :

- l'injection des fissures par un produit rigide pour assurer la continuité de la matière (se reporter à la norme **NF EN 1504-5** et au **GUIDE N°3 [FABEM]**),
- la mise en œuvre d'armatures passives additionnelles (tôles collées et composites), (se reporter au **GUIDE N°7 [FABEM]**),

■ **Seconde solution de réparation des fissures avec ajout de force :**

Elle est applicable aux structures en béton précontraint mais également aux structures en béton armé. Elle comporte :

- l'injection des fissures par un produit rigide pour assurer la continuité de la matière (se reporter à la norme **NF EN 1504-5** et au **GUIDE N°3 [FABEM]**),
- la mise en œuvre d'armatures de précontrainte additionnelles (se reporter au **GUIDE N°8 [FABEM]**),

Remarques :

■ *Dans les années 75, on a mis en œuvre des armatures passives de type tôles collées pour réparer des tabliers de ponts en béton précontraint qui présentaient une nette insuffisance de résistance à la flexion, marquée par des fissures actives. Les réparations n'ont pas permis de réduire, comme espéré, le souffle des fissures (en effet, pour que les tôles se mettent en traction, le film de colle doit subir une certaine déformation). La mise en œuvre d'une précontrainte additionnelle a permis de résoudre le problème. On ne dispose pas de retour d'expérience significatif à propos du remplacement des tôles métalliques par des **matériaux composites** mais, le même phénomène de déformation de la colle est probable ;*

■ *En revanche, le renforcement d'un ouvrage en béton précontraint non fissuré au moyen d'armatures passives extérieures au béton (tôles ou composites) est parfaitement possible ;*

■ *Les tôles collées ont cependant été utilisées avec succès pour renforcer des parties de structures en béton précontraint fonctionnant en béton armé, comme des hourdis de tabliers de ponts.*

La création d'un joint de dilatation est aussi envisageable dans certains cas (se reporter au **GUIDE N°2 [FABEM]**) qui explicite une telle solution.

Exemple de réparation :

Photo n° 59 : renforcement en tissus composite des abouts des poutres du pont sur la Drôme (crédit photo RCA - M.Trouillet)

- La surveillance et les nombreuses investigations effectuées sur les deux tabliers de type VIPP du pont de l'autoroute A 7 sur la Drôme construits en 1965 (tabliers composés de travées indépendantes constituées par des poutres préfabriquées post-contraintes réunies par un hourdis coulé en place et précontraint transversalement) ont révélé l'existence de câbles corrodés dont certains étaient rompus, ainsi que de gros défauts d'injection avec la présente d'eau fossile (décantation du coulis d'injection) dans les conduits.

En attendant les conclusions des études entreprises pour savoir s'il fallait (et comment) réparer ou remplacer les deux tabliers, une réparation provisoire pour mettre les poutres en sécurité vis-à-vis d'une rupture de type flexion-effort tranchant à proximité de leur about[29] a été réalisé en enveloppant les abouts par un tissus composite à base de fibres de carbone.

3.2.6.2.5.4 Les différentes solutions de renforcement d'éléments ou de structures dont la capacité portante est insuffisante

> Le problème du renforcement d'un ouvrage se pose lorsqu'il :

- change d'affectation (par exemple, réalisation d'une ligne de tramway ou passage d'un convoi exceptionnel sur un pont ou transformation d'un bâtiment avec modification de l'ossature porteuse) ;
- doit résister à des actions accidentelles (par exemple, chocs de véhicules, séisme…) et pour lesquelles il n'a pas été prévu ;
- n'a pas la capacité portante souhaitée à cause d'erreurs de conception ou de réalisation…

Le but d'un renforcement est de donner **la capacité portante** nécessaire à la structure concernée, normalement, **par ajout de matière et/ou de forces.** A ces travaux peuvent s'ajouter certaines réparations visées par le présent guide (par exemple, en cas de désordres dus au gel, à la corrosion des armatures) mais, aussi, des travaux connexes non visés dans le présent guide, tels que la mise en place de nouveaux équipements…

L'opération de renforcement peut imposer la mise sur cintre de la structure si le renforcement doit équilibrer à la fois les charges permanentes et d'exploitation, mais une dénivellation d'appui ou le réglage de la poussée d'un arc…peuvent jouer le même rôle. Le choix est fonction des mesures effectuées in situ sur l'ouvrage et des résultats de calculs sur la répartition des contraintes dans la structure lors de l'évaluation de l'ouvrage et de l'étude du projet de renforcement.

1. Solutions de renforcement par ajouts de béton et d'armatures passives intérieures au béton

- **Première solution de renforcement par ajout de béton et d'armatures passives intérieures au béton :**

Elle est applicable à une poutre, une dalle, une pile ou un poteau en béton armé…

Cette solution comporte :

- la mise en place d'un cintre, si nécessaire, suivi de la reprise des charges permanentes (par exemple, par vérinage),
- la démolition du béton d'enrobage pour dégager les armatures, si besoin est, suivi d'une préparation de surface,

[29] À proximité de l'about d'une poutre VIPP, les câbles étant relevés, la résistance vis-à-vis de l'amorçage d'une fissure de flexion-effort tranchant pouvant causer la rupture brutale de la poutre est relativement faible en cas de rupture par corrosion

- le scellement d'armatures de couture dans le béton conservé et la mise en place d'armatures supplémentaires (avec recouvrements ou soudures),
- la réalisation de la nouvelle géométrie de la pièce, le béton ajouté pouvant être mis en place classiquement ou par injection sous pression ou par projection (le béton est mis en place classiquement dans le cas d'un plancher),
- si besoin est, une injection périphérique pour améliorer le collage,
- la mise en charge de la structure renforcée par décintrement ou par ajout de force, en général par déformation imposée (vérinage, réglage de poussée...),
- la mise en œuvre d'un revêtement d'aspect et/ou de protection.

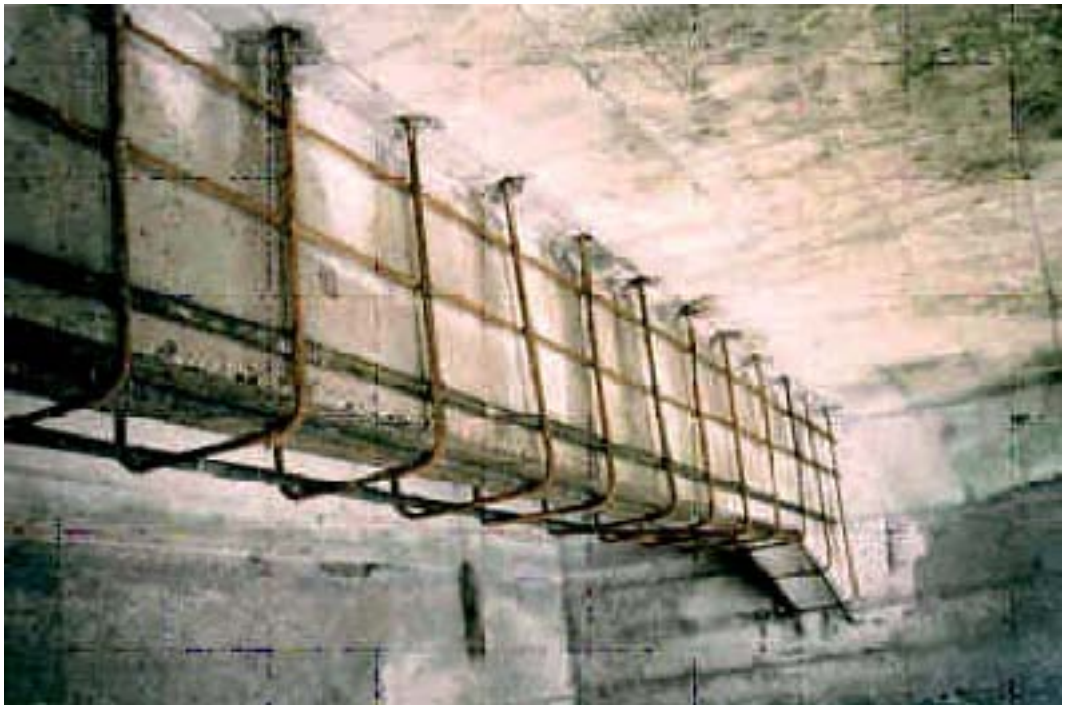


Photo n° 60 : renforcement des poutres de la passerelle du barrage de Pizançon (crédit photo Freyssinet)

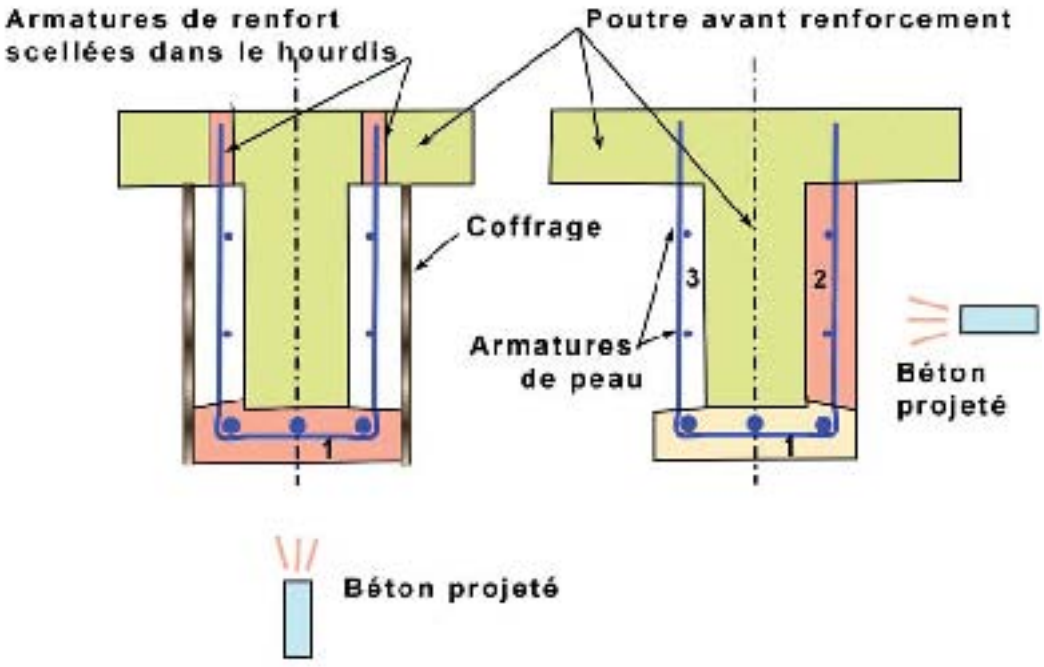


Figure n° 17 : principe de renforcement d'une poutre par ajout de béton et d'armatures

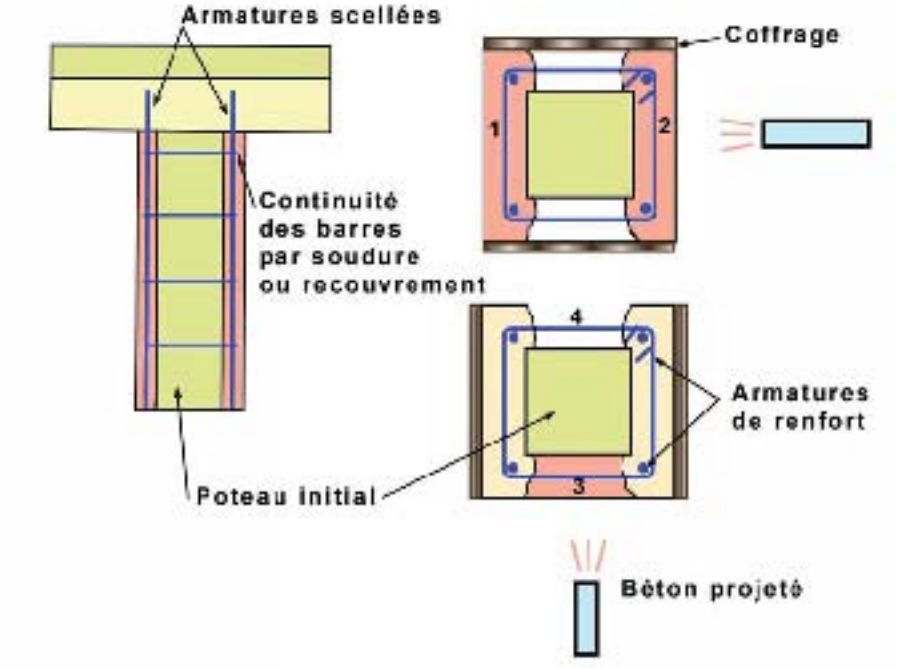


Figure n° 18 : principe de renforcement d'un poteau, vis-à-vis des charges d'exploitation seules, par ajout de béton et armatures

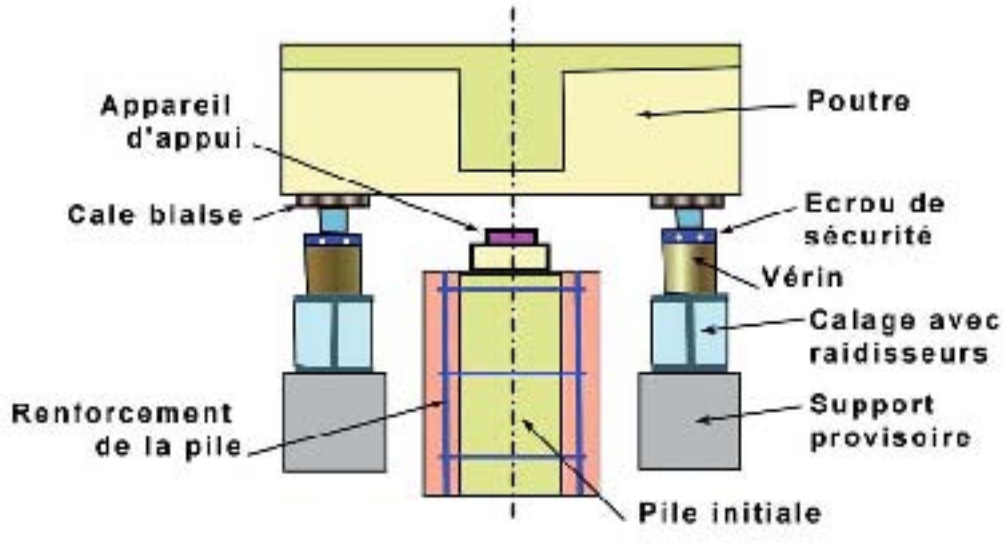


Figure n° 19 : principe de renforcement d'une pile, vis-à-vis des charges permanentes et d'exploitation, avec mise en charge par vérinage

■ **Seconde solution de renforcement par ajout de béton et d'armatures passives intérieures au béton :**

Ce renforcement appelé, **«béton contrecollé»**, est applicable à une dalle de couverture, un plancher…

Le coulage sur une dalle existante d'une couche de béton armé permet **d'augmenter le bras de levier des armatures et, par voie de conséquence, le moment résistant qu'elles peuvent équilibrer.** L'augmentation du moment résistant compense, normalement, largement le supplément de poids propre dû à la couche de béton additionnelle. Il est donc possible d'admettre **des charges d'exploitation plus élevées.**

Dans le cas où la dalle est soumise à **des sollicitations dynamiques,** afin d'éviter une rupture dans le plan de reprise de bétonnage sous l'action des cisaillements qui s'y développent, les règles de calcul du béton armé imposent **de mettre des armatures de couture.** Il faut donc forer dans la dalle un nombre très important de trous pour y sceller les armatures de couture, ce qui rend la solution très onéreuse et, de plus, transforme la dalle en un véritable «gruyère» préjudiciable à sa résistance, en particulier, lorsque la résistance du béton de la dalle n'est pas très élevée… Cette solution classique de renforcement d'une dalle n'est donc pas envisageable dans tous les cas.

Le béton contrecollé a été mis au point par **L'HERMITE** pour renforcer la capacité portante des planchers du CNIT à la Défense. Après divers travaux préparatoires, l'extrados des planchers a été enduit d'une colle époxyde sur laquelle a été coulée une surépaisseur de béton. **Le collage** permet de considérer que **le hourdis de la dalle ainsi renforcée a été coulé en une seule phase.** Il permettrait donc théoriquement de supprimer les armatures de couture. Dans la pratique, il faut mettre en place **deux types d'armatures de couture scellées** ou connecteurs :

- des connecteurs (quelques connecteurs au m²) chargés d'éviter, **en cas d'un défaut de collage local,** une déchirure du plan de reprise de bétonnage ;
- des connecteurs à la périphérie de la dalle pour équilibrer les cisaillements développés par **le retrait différentiel** entre les deux bétons d'âges très différents (la méthode de calcul de ces armatures est voisine de celle utilisée pour le dimensionnement des connecteurs des ponts mixtes acier-béton nécessaires pour reprendre les efforts développés par retrait à l'interface entre le béton et l'ossature métallique).

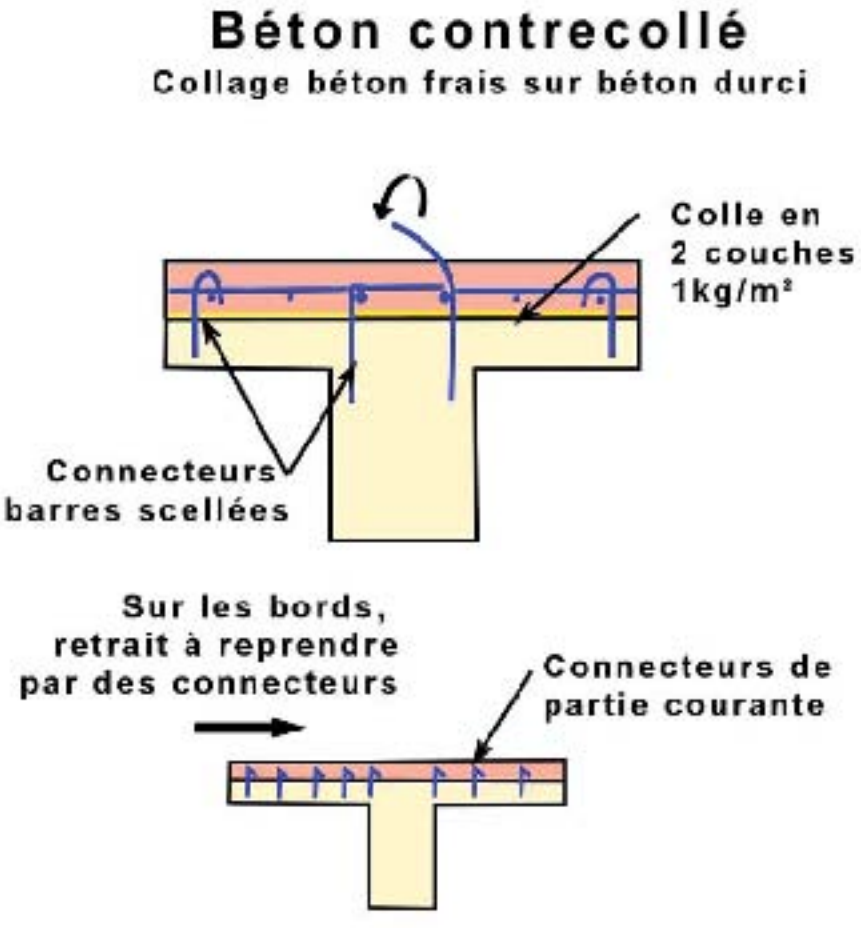


Figure n° 20 : principe de réalisation d'un renforcement d'une dalle et d'une poutre par béton contrecollé

> Cette solution comporte :

- la mise en place d'un cintre, si nécessaire, suivi de la reprise des charges permanentes (par exemple, par vérinage),
- la démolition du béton d'enrobage pour dégager les armatures, si besoin est, suivie d'une préparation de surface,
- le scellement d'armatures de couture dans le béton conservé et la mise en place d'armatures supplémentaires (avec recouvrements ou soudures),
- la mise en place d'une colle «béton frais sur béton durci»,
- la réalisation de la nouvelle géométrie de la pièce, le béton ajouté étant mis en place classiquement,
- la mise en charge de la structure renforcée par décintrement.

Photo n° 61 : renforcement du hourdis supérieur du pont de Guignicourt par béton contrecollé (crédit photo D. Poineau)

Remarque : *ces deux méthodes de renforcement (solutions 1 et 2) peuvent être appliquées à* ***une structure précontrainte.*** *Cependant, une opération supplémentaire est à prévoir, à savoir la mise en place d'armatures de précontrainte extérieures longitudinales, voire verticales (étriers actifs).*

Exemple de renforcement :

Photo n° 62 : tablier provisoire et ferraillage de l'élargissement du pont de Bellevue (crédit photo CÉTÉ de l'Ouest - M.D. Guillot)

■ Les nouvelles contraintes du plan de circulation autour de l'agglomération nantaise ont conduit à élargir un des deux tabliers du pont de Bellevue sur la Loire. L'élargissement a été obtenu entre connectant sur le hourdis existant un nouvel hourdis plus large en respectant un phasage rigoureux pour limiter, en particulier, les effets des retraits différentiels. Cet élargissement a été accompagné d'un renforcement longitudinal par précontrainte additionnelle afin d'équilibrer le supplément de charges permanentes et d'exploitation. De plus, un renforcement des âmes par une précontrainte verticale additionnelle a été également nécessaire. Pendant tous les travaux, le trafic a pu être maintenu sur l'ouvrage grâce à un tablier métallique provisoire dégageant localement la zone de travail nécessaire au coffrage, ferraillage et bétonnage de chaque plot du nouvel hourdis.

Photo n° 63 : bétonnage du dernier plot de l'élargissement du pont de Bellevue (crédit photo CÉTÉ de l'Ouest - M. D. Guillot)

2. Solutions de renforcement par ajouts d'armatures passives extérieures au béton (se reporter au GUIDE N°7 [FABEM])

■ Première solution de renforcement par collage de tôles ou de composites (tissus ou plaques) sous forme d'armatures extérieures au béton :

Ce renforcement est applicable à des pièces fléchies ou cisaillées, telles qu'une poutre, une dalle en béton armé… Il comporte :

- la mise en place d'un cintre, si nécessaire, suivi de la reprise des charges permanentes (par exemple, par vérinage),
- la préparation de surface du béton (ponçage, ragréage, nettoyage),
- l'encollage en double face (le béton et l'armature additionnelle),
- la mise en place de l'armature (avec mise sous pression dans le cas des tôles collées),
- si besoin est, la mise en charge de la réparation par décintrement,
- la mise en place d'un revêtement de protection de l'armature extérieure (par exemple, peinture anticorrosion pour les tôles collées).

Photo n° 64 : renforcement de poutres fléchies par plaques de composites (pultrudés) (crédit photo VSL France)

Photo n° 65 : renforcement de poutres en béton armé à l'effort tranchant PI A 6 à Arcueil (crédit photo VSL France – M. Loubeyre)

■ **Seconde solution de renforcement par collage de tôles ou de composites (tissus ou plaques) sous forme d'armatures extérieures au béton :**

Ce renforcement est applicable à des pièces comprimées, voire fléchies et comprimées telles qu'une pile ou un poteau en béton armé… :

La réalisation des travaux est identique à ceux de la solution n°1. Seul le mode de fonctionnement de l'armature, qui entoure la pièce comprimée et y exerce **un effort de frettage,** change. Un tel renforcement est utilisé, par exemple, pour des poteaux et des piles non dimensionnés pour des séismes…

Photo n° 66 : frettage de poteaux par composites (crédit photo Freyssinet)

3. Solutions de renforcement par ajouts d'armatures de précontrainte intérieures ou extérieures au béton (se reporter au GUIDE N°8 [FABEM])

■ **Première solution de renforcement par armatures de précontraintes intérieures au béton :**

Ce renforcement est applicable, par exemple, à l'âme d'une poutre présentant une insuffisance de résistance à l'effort tranchant… Il comporte :

- l'implantation très soignée de la position des forages pour ne pas sectionner les armatures passives et actives existantes,

- le forage de l'âme sur toute sa hauteur avec un carottier pour réaliser le conduit dans lequel sera introduite l'armature de précontrainte (barre ou monotoron),

- la mise en tension de l'armature en respectant une procédure spécifique et en effectuant des contrôles très spécifiques,

- l'injection du conduit et la réalisation des cachetages pour assurer la protection des armatures et des ancrages).

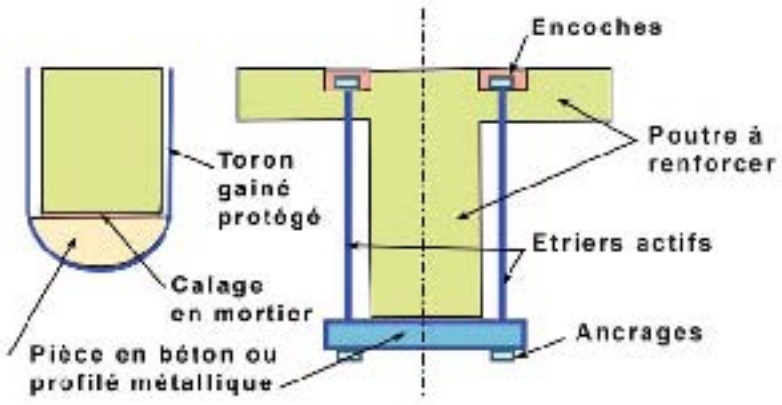


Figure n° 21 : principes de renforcement d'une poutre à l'effort tranchant par étriers actifs extérieurs

Remarque : *l'armature de renforcement peut aussi être placée à l'extérieur de l'âme de la poutre. Dans un tel cas, il est préférable de disposer les renforts de part et d'autre de l'âme pour limiter les flexions parasites de celle-ci.*

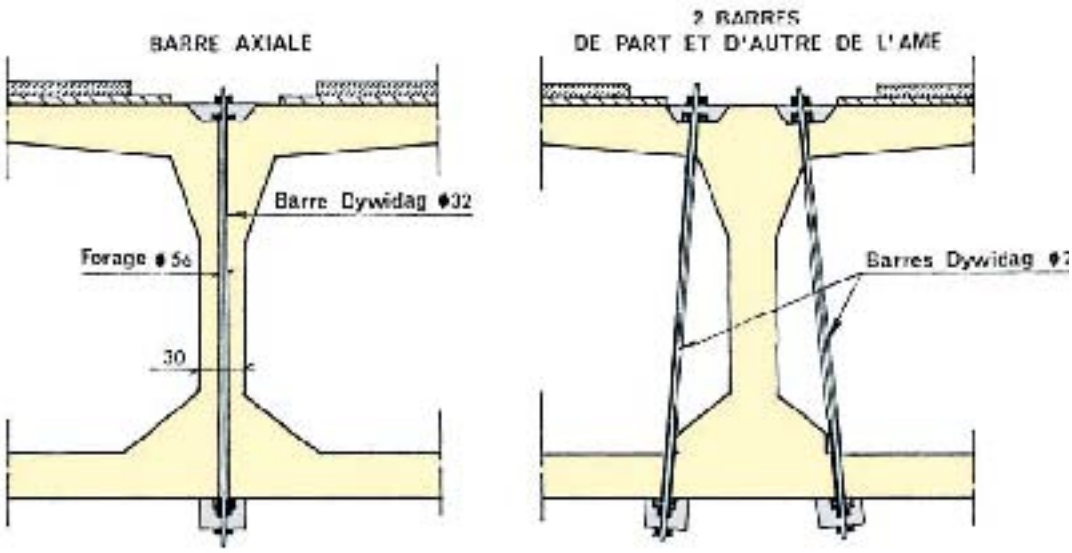


Figure n° 22 : principes de renforcement de l'âme d'une poutre-caisson par des barres de précontrainte

Photo n° 67 : renforcement à l'effort tranchant par étriers actifs en acier inoxydable du pont de Labéraudie (crédit-photo D. Poineau)

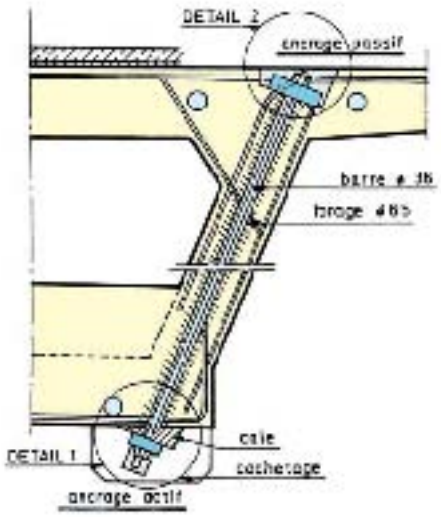


Figure n° 23 : principe de renforcement à l'effort tranchant du viaduc de Saint-Isidore (autoroute A 8)

■ **Seconde solution de renforcement par armatures de précontraintes extérieures au béton :**

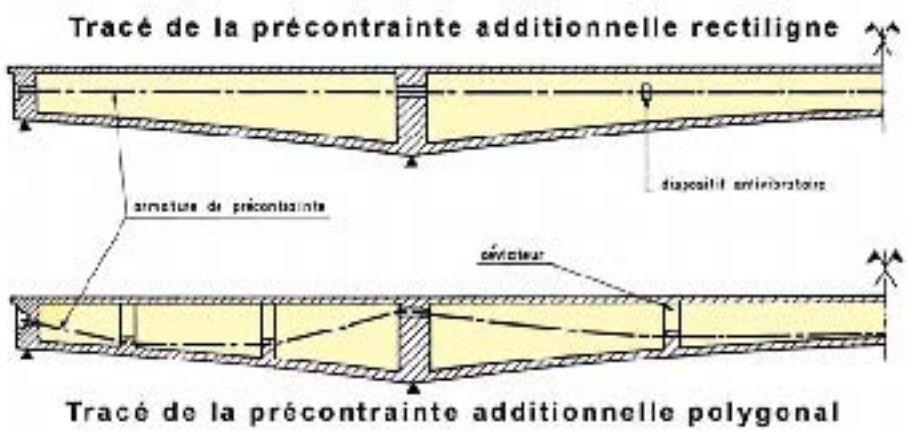


Figure n° 24 : principes de renforcement d'une poutre par précontrainte additionnelle longitudinale

Ce renforcement est applicable, par exemple, à une poutre présentant une insuffisance de résistance vis-à-vis de la flexion… Il comporte :

- l'implantation soignée de la position des différents éléments à réaliser,
- la réalisation des pièces d'ancrage et de déviation, ce qui impose des forages, des scellements d'armatures, la mise en place d'armatures et de coffrages et enfin le bétonnage des pièces. Ces différents éléments, une fois réalisés, vont permettre de mettre en place les armatures de précontrainte à l'intérieur d'un conduit (gaine),
- la mise en tension de l'armature en respectant une procédure et en effectuant des contrôles très spécifiques,
- l'injection du conduit et la réalisation des cachetages pour assurer la protection des armatures et des ancrages.

Photo n° 68 : renforcement par précontrainte additionnelle d'un ouvrage de la corniche à Marseille (crédit photo Communauté Urbaine de Marseille)

3.2.6.3 Les méthodes de réparation à mettre en œuvre pour préserver les armatures passives de la corrosion ou pour traiter les armatures corrodées

Nota : *le présent texte s'applique* ***aux armatures passives*** *des constructions en béton armé comme à celles des constructions en béton précontraint mais, pour ces dernières, avec quelques réserves sur les procédés électrochimiques.* ***Le cas des armatures actives*** *(les armatures de précontrainte) est traité dans* ***LE GUIDE N°8 [FABEM] : armatures de précontrainte additionnelle.***

3.2.6.3.1 Généralités

Pour bien comprendre certains termes utilisés ci-après, tels que ceux **de contrôles anodique et cathodique,** il faut se reporter à l'article 3.2.3.3.8.2 ci-devant qui traite de **la corrosion électrochimique** et des diverses réactions qui se produisent.

> Les méthodes de réparation applicables aux armatures passives doivent satisfaire aux deux objectifs suivants :

1. **la préservation des armatures non encore touchées par la corrosion ;**
2. **la restauration de la passivation des armatures touchées par la corrosion, voire le remplacement des armatures endommagées ou détruites.**

Très important, lors du choix **d'une méthode de réparation contre les effets de la corrosion,** il faut s'assurer que cette méthode n'entraînera pas **des effets pervers** comme ceux listés ci-dessous :

- les méthodes électrochimiques peuvent fragiliser les armatures de précontrainte vis-à-vis de la corrosion fissurante sous tension, ou rendre le béton sensible à une alcali-réaction ;
- les méthodes de réduction de l'humidité peuvent entraîner une augmentation de la vitesse de carbonatation[30];
- une méthode de contrôle anodique, comme la mise en œuvre d'un revêtement étanche sur les armatures (produit à base d'une résine synthétique), impose que l'armature soit totalement revêtue. Dans le cas contraire, il risque de se former au contact des agents agressifs et, au droit d'une blessure du revêtement, une corrosion par piqûre qui se développera vers l'intérieur sous forme de corrosion dite «caverneuse» (pile d'aération différentielle) et qui entraînera la destruction de l'armature sous le revêtement de protection…

[30] La carbonatation est inexistante dans une atmosphère parfaitement sèche ou totalement saturée mais est maximale pour un taux d'humidité d'environ 60%.

Photo n° 69 : corrosion d'une armature de béton armé revêtue d'époxy (extrait d'une revue US)

De plus, la méthode de réparation contre les effets de la corrosion doit être compatible avec **la méthode retenue pour réparer les désordres d'origine physique, chimique ou mécanique** qui se superposent, éventuellement, à ceux créés par la corrosion.

Enfin, après la plupart des réparations nécessaires à la jugulation d'une corrosion, il faut protéger la structure contre les agents agressifs présents dans son environnement pour empêcher le développement **d'une nouvelle corrosion.** Une bonne partie des méthodes développées dans l'article 3.2.6.3.2 qui suit peuvent assurer la protection exigée.

Bien entendu, dans certains cas, lorsque les désordres sont trop importants, la solution de démolition-reconstruction s'impose.

Pour de plus amples informations sur les méthodes de réparation, il est loisible de consulter **le guide de juillet 2004 de l'AFGC** relatif à la maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction.

Photo n° 70 : guide de l'AFGC de juillet 2004 (crédit photo AFGC)

3.2.6.3.2 Les méthodes (préventives) destinées à préserver la passivité des armatures non encore touchées par la corrosion

Le cas se présente, par exemple, lorsque le béton d'enrobage des armatures n'est pas entièrement carbonaté et/ou qu'il contient un taux de chlorures ou d'autres halogénures et produits nettement inférieur au seuil critique (voir le nota). Les armatures se trouvent **en période d'incubation.**

Dans la pratique, pour qu'un tel cas puisse se présenter, il faut que l'ouvrage soit soumis à **une surveillance** prévoyant, à intervalles réguliers, des mesures telles que celle de la profondeur de pénétration des agents agressifs et de leur dosage.

ATTENTION, *si le taux de chlorures est très élevé dans les premiers centimètres de l'enrobage et si on réalise, pour empêcher la pénétration des chlorures extérieurs, un revêtement à la surface du béton en pensant ainsi éviter la corrosion des armatures, les chlorures prisonniers vont continuer à se répartir dans le béton par diffusivité et arriver au contact des armatures où ils peuvent atteindre le seuil critique pouvant entraîner leur corrosion.*

Les méthodes de réparations préventives, listées ci-après, sont beaucoup moins coûteuses que **les méthodes curatives** décrites dans l'article 3.2.6.3.3 ci-après. Elles sont à rattacher à **l'entretien préventif** qui devrait être «le credo» des maîtres d'ouvrages.

Le guide de juillet 2004 de l'AFGC relatif à la maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction décrit dans **son annexe A 15.4** comment mettre en place **des éléments témoins et mesurer les indicateurs de durabilité** que sont : l'enrobage des armatures, la porosité et la perméabilité du béton ainsi que l'évolution des profils de carbonatation et des chlorures. Les contrôles périodiques permettent de savoir à quel moment intervenir pour mettre en œuvre une des méthodes préventives décrites ci-après.

> Les méthodes spécifiques disponibles pour répondre à cet objectif sont essentiellement :

- **les méthodes de protection contre la pénétration des agents agressifs** sous forme liquide et/ou gazeuse (chlorures, gaz carbonique…). Ces méthodes font appel à la mise en œuvre :
  - si besoin est, des diverses techniques de traitement des fissures (injection, calfeutrement et pontage),
  - d'une imprégnation de surface bouchant les pores du matériau béton vis-à-vis de la vapeur d'eau et/ou de l'eau liquide,
  - d'un revêtement de protection étanche à l'eau liquide à la vapeur d'eau et/ou aux gaz,
  - d'une membrane étanche… ;
- **les méthodes de contrôle ou de limitation de l'humidité** qui sert d'électrolyte aux réactions de corrosion. La réduction de l'humidité en provenance de l'extérieur permet d'augmenter **la résistivité du béton,** qui s'oppose au développement des piles de corrosion. Ce contrôle peut être obtenu par la mise en œuvre :
  - si besoin est, des diverses techniques de traitement des fissures (injection, calfeutrement et pontage),
  - d'une imprégnation de surface hydrophobe bouchant les pores du matériau béton contre l'absorption de l'eau,
  - d'un revêtement de protection étanche à l'eau liquide et/ou sous forme de vapeur,
  - d'un traitement électrochimique[31] qui s'oppose à la circulation de l'eau dans le béton (par exemple, un tel traitement peut empêcher les remontées d'eau dans un mur) ;

[31] ***Des essais préliminaires sont indispensables*** *pour s'assurer que le traitement ne risque pas de provoquer la corrosion des armatures ou le déclenchement d'une alcali-réaction (présence de granulats potentiellement réactifs).*

- **les méthodes de contrôle cathodique qui s'oppose à l'arrivée de l'oxygène sur les zones cathodiques.** Ces méthodes font appel à la mise en œuvre :

  - d'un revêtement de protection étanche aux gaz ;

- **les méthodes de restauration du pH.** Ces méthodes font appel à la mise en œuvre :

  - d'une ré-alcalinisation par diffusion des alcalins, qui peut être obtenue par la mise en place sur la surface de la pièce d'un enduit à base de liants hydrauliques,

  - si besoin est, d'une ré-alcalinisation électrochimique (technique décrite ci-après dans le présent guide avec ses limites d'emploi), éventuellement précédée d'une extraction électrochimique des chlorures.

Certaine des méthodes destinées à restaurer la passivation des armatures développées dans l'article qui suit peuvent aussi être utilisées **pour préserver les armatures non encore corrodées** (par exemple, la mise en place **«d'une prévention cathodique»** peut être envisagée lorsque la surveillance d'un ouvrage montre que l'environnement est beaucoup plus agressif que prévu avec, par voie de conséquence, une réduction drastique de la période d'incubation et de la durée de vie souhaitée de l'ouvrage…).

Remarque : *la liste des méthodes ci-dessus montre* ***que certaines des techniques*** *(par exemple, les revêtements de protection[32]) peuvent être appliquées pour assurer au béton aussi bien sa protection contre la pénétration d'agents agressifs que contre l'humidité et la pénétration de l'oxygène, tout en le protégeant contre des attaques chimiques. En effet, certains revêtements de protection peuvent être qualifiés d'universels car ils peuvent avoir, à la fois, une faible perméabilité aux gaz, à la vapeur d'eau et à l'eau liquide… En revanche, les imprégnations restent perméables aux gaz. Il convient de se référer aux fiches techniques des produits pour choisir le produit le mieux adapté.*

3.2.6.3.3 Les méthodes (curatives) destinées à restaurer la passivation des armatures touchées par la corrosion

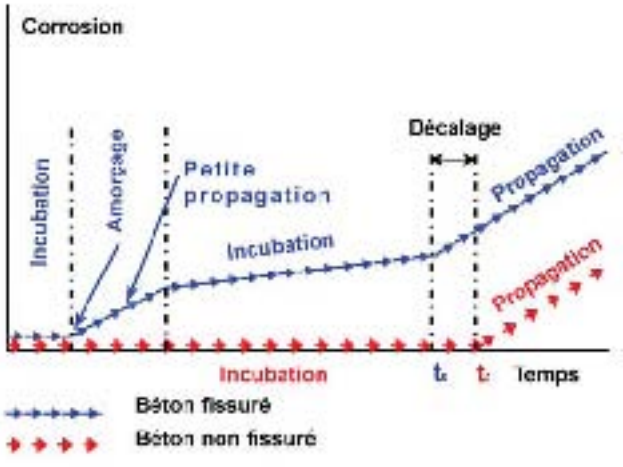


Figure n° 25 : évolution de la corrosion des armatures suivant que le béton est ou non fissuré

[32] *Se reporter* ***au guide technique de 2002 du LCPC et au guide de l'AFNOR GA P 18-902.***

Très important, les méthodes de traitement de la corrosion, sauf la protection cathodique qui protège en permanence la structure, ne peuvent empêcher la corrosion de se manifester à nouveau après un nouveau cycle d'incubation si des agents agressifs peuvent encore venir au contact du béton de la structure. Il faut donc prévoir, en supplément, la mise en œuvre d'une protection de la surface du béton, voire d'autres travaux (par exemple, la réfection de la chape d'étanchéité, la remise en état des dispositifs de drainage des eaux…).

> Les quatre méthodes spécifiques disponibles pour répondre à cet objectif sont essentiellement :

- **le remplacement du béton carbonaté, pollué et/ou désorganisé complété, si nécessaire, par divers traitements de protection des armatures ;**
- **la protection cathodique ;**
- **la déminéralisation et la ré-alcalinisation électrochimiques ;**
- **la mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion à la surface du béton.**

> Le choix de la méthode de réparation à adopter dépend, en particulier, du niveau de propagation de la corrosion :

- la corrosion peut être localisée à certaines parties (zones de défaut d'enrobage) ou généralisée à toutes les armatures ;
- les armatures peuvent être simplement rouillées ou profondément attaquées, voire même totalement détruites ;
- le béton peut être intact ou plus ou moins désorganisé (délaminations internes, fissurations plus ou moins ouvertes, éclatements, dégarnissage complet des armatures…) ;

Une même méthode de réparation (par exemple : la purge du béton pollué et désorganisé puis sa reconstitution) peut être utilisée pour réparer **les désordres dus à la corrosion à divers stades de leur évolution** (par exemple, depuis l'amorçage de la corrosion jusqu'à la corrosion totale des armatures). **Le tableau** ci-après synthétise le domaine d'application de chaque méthode de réparation **(les critères de choix)** en prenant **le degré d'avancement de la corrosion** comme repère. Ce tableau est complété par un second tableau qui précise les avantages et les inconvénients de chacune des méthodes de réparation.

Après la mise en œuvre d'une restauration de la passivité des armatures, la réalisation d'un revêtement de protection peut être nécessaire.

ATTENTION, *les informations contenues dans ces tableaux ne doivent pas être appliquées sans un minimum de réflexion.* ***Il est rappelé que le présent guide n'a pas pour but de se substituer au concepteur*** *de la réparation qui a pour rôle de mettre au point le projet en faisant la synthèse de toutes les exigences à satisfaire.*

À la suite de ces deux tableaux **les quatre méthodes de réparation sont décrites** et leur domaine d'emploi explicité.

Le lecteur pourra se reporter, pour de plus amples détails sur les **différentes techniques de réparation** proposées, **au guide de novembre 2003 de l'AFGC** sur la réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion ainsi qu'à la norme **NF EN 12696** (protection cathodique) et au fascicule de documentation **FD CEN/TS 14038-1** (ré-alcalinisation électrochimique).

Les méthodes de restauration de la passivation des armatures											
Description des méthodes		Début de la propagation sans désorganisation interne du béton		Pendant la propagation avec désorganisation locale du béton (à cause d'un défaut d'enrobage, d'un nid de cailloux…)		Pendant la propagation avec désorganisation du béton mais faible réduction de la section des armatures		Pendant la propagation avec désorganisation du béton et des armatures		revêtement de protection après réparation
		Solutions	Observations	Solutions	Observations	Solutions	Observations	Solutions	Observations	Finition
1ère méthode	(a) Remplacement du béton	/		O	Indispensable Réparation locale	O	Indispensable Réparation ± généralisée	O	Indispensable (démolition reconstruction en variante)	O Conseillé sauf cas particuliers
	(b) Remplacement des armatures			S	Rarement	S	Parfois	O	Souvent (armatures inoxydables… en variante)	
	(c) Protection des armatures			O	Indispensable	O	Normalement (sauf béton projeté…)	O	Normalement (sauf béton projeté…)	
2ème méthode	(d) Protection cathodique par anodes actives	O = (d) ou (e)	Se substitue aux méthodes 3 et 4	S + (d) ou (e)	Peut s'ajouter à la méthode 1 mais pas à 3 et 4	S + (d) ou (e)	Peut s'ajouter à la méthode 1	S + (d) ou (e)	Peut s'ajouter à la méthode 1	/
	(e) Protection cathodique par courant imposé									/
3ème méthode	(f) Déminéralisation électrochimique par anode active	O =	Se substitue aux méthodes 2 et 4 Domaine d'emploi limité	S + (f) et/ou (g)	Peut s'ajouter à la méthode 1 mais pas à 2 et 4 Domaine d'emploi limité	/	Normalement pas applicable	/	Non applicable	O Conseillé
	(g) Ré-alcalinisation par anode active									O Conseillé
	(h) Déminéralisation électrochimique par courant imposé	O =	Se substitue aux méthodes 2 et 4 Domaine d'emploi limité	S + (h) et/ou (i)	Peut s'ajouter à la méthode 1 mais pas à 2 et 4 Domaine d'emploi limité	/	Normalement pas applicable	/	Non applicable	O Conseillé
	(i) Ré-alcalinisation par courant imposé									O Conseillé
4ème méthode	(j) Inhibiteurs de corrosion à la surface du béton	O =	Se substitue aux méthodes 2 et 3 Domaine d'emploi expérimental	S +	Peut s'ajouter à la méthode 1 mais pas à 2 et 3 Domaine d'emploi expérimental	S +	Peut parfois s'ajouter à la méthode 1	S +	Peut s'ajouter à la méthode 1	O Conseillé

Tableau n° 12 : méthodes de restauration de la passivité des armatures

Légende :
O : *réparation à retenir*
O = : *réparations pouvant satisfaire le même objectif (utiliser l'une ou l'autre)*
S : *si besoin est*
S + : *vient en supplément, si besoin est*

Avantages et inconvénients des différentes méthodes de restauration de la passivation			
Méthodes	**Description**	**Avantages**	**Inconvénients**
1ère méthode	Remplacement du béton	■ méthode classique ■ applicable dans presque tous les cas ■ indispensable avant d'autres traitements ■ coût, le plus souvent, compétitif	■ destructive donc traumatisante pour la structure ■ durabilité de la réparation aléatoire : - si appliquée seule sans respect rigoureux de la procédure ; - si la réparation provoque une inversion de polarité ; - s'il n'y a pas de travaux complémentaires pour préserver la passivité des armatures en dehors des zones traitées (ré-alcalin isation, mise en place d'une protection…);
2ème méthode	a) Protection cathodique à anode active	■ méthode moins contraignante que la méthode b) une fois l'installation réalisée	■ délicate d'application (spécialistes) ■ la norme ne s'applique pas aux structures enterrées et immergées ■ la restauration des zones présentant des délamination est indispensable de même que l'enlèvement de la rouille non adhérente (le béton intact même carbonaté ou chloruré n'a pas à être restauré) ■ tous les objets métalliques électrique-ment isolés du circuit doivent être enlevés ou raccordés au circuit ■ risque de corrosion fissurante sous tension pour les armatures de BP ■ risque de favoriser l'alcali-réaction si les exigences de la norme ne sont pas respectées ■ doit être précédée par la méthode 1 lorsqu'il y a désorganisation du béton et des armatures ■ nécessite un béton de résistivité pas trop élevée ■ surveillance nécessaire ■ coût
	b) Protection cathodique à courant imposé	■ méthode universelle ■ s'applique même si la résistivité du béton est élevée	■ délicate d'application (spécialistes) ■ la norme actuelle ne s'applique pas aux structures enterrées et immergées ■ la restauration des zones présentant des délaminations est indispensable de même que l'enlèvement de la rouille non adhérente (le béton intact même carbonaté ou chloruré n'a pas à être restauré) ■ tous les objets métalliques électrique-ment isolés du circuit doivent être enlevés ou raccordés au circuit ■ risque de corrosion fissurante sous tension pour les armatures de BP ■ risque de favoriser l'alcali-réaction si les exigences de la norme ne sont pas respectées ■ contrôle indispensable lors de l'exploita-tion ■ coût d'installation et d'exploitation

Avantages et inconvénients des différentes méthodes de restauration de la passivation			
Méthodes	**Description**	**Avantages**	**Inconvénients**
3ème méthode	a) Déminéralisation à anode active	■ méthode non traumatisante pour la structure ■ élimination rapide des chlorures ■ déchloruration et ré-alcalinisation simultanées possibles	■ délicate d'application (spécialistes) ■ domaine d'application réduit (profondeur de la carbonatation et/ou des chlorures ≤ à l'enrobage des armatures) ■ l'extraction des chlorures n'est pas totale (50 à 80%) ■ risque de corrosion fissurante sous tension pour les armatures de BP ■ risque de favoriser l'alcali-réaction ■ la restauration des zones présentant des délamination est indispensable de même que l'enlèvement de la rouille non adhérente (le béton intact même carbonaté ou chloruré n'a pas a être restauré) ■ protection du béton après traitement nécessaire ■ coût
	b) Ré-alcalinisation à anode active	■ méthode non traumatisante pour la structure ■ régénération rapide du pH et de la passivation des armatures ■ déchloruration et ré-alcalinisation simultanées possibles	
	c) Déminéralisation à courant imposé	■ méthode non traumatisante pour la structure ■ élimination rapide des chlorures	■ délicate d'application (spécialistes) ■ domaine d'application réduit (profondeur de la carbonatation et/ou des chlorures ≤ à l'enrobage des armatures) ■ l'extraction des chlorures n'est pas totale (50 à 80%) ■ risque de corrosion fissurante sous tension pour les armatures de BP ■ risque de favoriser l'alcali-réaction ■ la restauration des zones présentant des délamination est indispensable de même que l'enlèvement de la rouille non adhérente (le béton intact même carbonaté ou chloruré n'a pas à être restauré) ■ protection du béton après traitement nécessaire ■ coût
	d) Ré-alcalinisation à courant imposé	■ méthode non traumatisante pour la structure ■ régénération rapide du pH et de la passivation des armatures	
4ème méthode	Inhibiteurs de corrosion à la surface du béton	■ méthode non traumatisante pour la structure ■ coût	■ domaine d'application réduit (par exemple, faible teneur en chlorures et béton carbonaté car un pH élevé bloque l'effet des inhibiteurs) ■ controverses sur l'efficacité de certains inhibiteurs ■ manque de méthodes de validation de l'efficacité du traitement ■ protection du béton après traitement nécessaire

Tableau n° 13 : avantages et inconvénients des différentes méthodes de restauration de la passivité des armatures

3.2.6.3.3.1 Première méthode : le remplacement du béton pollué et/ou désorganisé et les divers traitements de protection des armatures

ATTENTION, cette méthode risque d'être vouée à l'échec dans les deux cas suivants :

- **si la réparation est limitée aux seules zones où la corrosion se manifeste visuellement par des désordres.** En effet, si les armatures dans les autres parties de la structure en sont au début de la période de propagation (faible corrosion n'endommageant pas le béton), de nouveaux désordres vont apparaître par inversion de polarité (l'ancienne anode se transforme en cathode et vice et versa), même si un revêtement de protection est mis en œuvre à la fin du traitement.

Dans un tel cas, il faut, soit procéder au remplacement total du béton pollué, soit appliquer en complément du traitement local une des méthodes décrites ci-après (déminéralisation, ré-alcalinisation…) ;

- **dans le cas où les armatures corrodées ne sont pas dégagées totalement de leur gangue de béton** (se reporter à l'article 4.2.1.2.3 ci-après qui décrit la méthode de préparation des armatures) et ce pour les mêmes raisons que précédemment (bien entendu, si les armatures ne présentent pas de traces de corrosion, ce dégagement n'est pas nécessaire).

Photo n° 71 : corrosion par inversion de polarité après réparation (crédit photo Freyssinet)

■ Le remplacement du béton pollué :

Nota : *cette méthode comporte au plus huit (8) phases (seules les phases 2, 4 et 6, voire 5 doivent obligatoirement être mise en œuvre, les autres sont applicables si besoin est).*

1ère phase : si besoin est, **la structure est mise sur cintre.** Le cas se présente lorsque la stabilité et/ou la résistance de la structure risquent d'être mises en jeu par les travaux de la seconde phase (par exemple, dégagement des armatures sur de grandes longueurs, enlèvement de la totalité du béton de certaines parties de la structure…) ;

2ère phase : les armatures corrodées sont débarrassées de la gangue de béton qui les entoure au moyen de divers procédés et en respectant certaines précautions décrits dans la suite du présent guide ;

3ème phase : si besoin est (corrosion avec réduction de section notable), **certaines armatures doivent être remplacées** (scellement d'armatures, soudure bout à bout…) afin de redonner à l'ossature sa capacité portante ;

4ème phase : les armatures sont obligatoirement débarrassées de toute trace de corrosion manuellement ou mécaniquement lorsque le procédé d'enlèvement du béton de la deuxième phase n'assure pas cette fonction. Cette phase (ou la seconde phase) est suivie d'un nettoyage pour éliminer toutes les souillures, les poussières… ;

5ème phase : les armatures, immédiatement après **la quatrième phase,** doivent recevoir **une protection contre la corrosion** sauf dans le cas où cette protection n'est pas strictement nécessaire (par exemple, en cas de remplacement complet du béton de la pièce) ou est incompatible avec le procédé de reconstitution de la géométrie de la pièce de la sixième phase (par exemple, le béton projeté) ;

6ème phase : le béton d'enrobage des armatures est reconstitué de façon à retrouver la géométrie de la structure (ragréage manuel ou mécanique, béton coulé, béton injecté, béton projeté…). Il est aussi possible d'augmenter le recouvrement des armatures, ce qui ré-alcalinise le béton et augmente sa résistivité ;

Nota : *la mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion (mélangés au matériau de réparation ou appliqués à la surface du béton) peut être associée aux travaux de remplacement du béton pollué. Se reporter à* ***l'article 3.2.6.3.3.4 ci-après.***

7ème phase : la structure est décintrée après durcissement du matériau de réfection du béton d'enrobage ;

8ème phase : si besoin est, **une protection de surface** est mise en œuvre.

Nota : *de plus, un traitement* ***permanent contre la corrosion,*** *telle qu'une protection cathodique, peut être nécessaire dans certains cas.*

Photo n° 72 phases 1 et 2 d'une réparation par enlèvement du béton pollué (crédit photo Parexlanko)

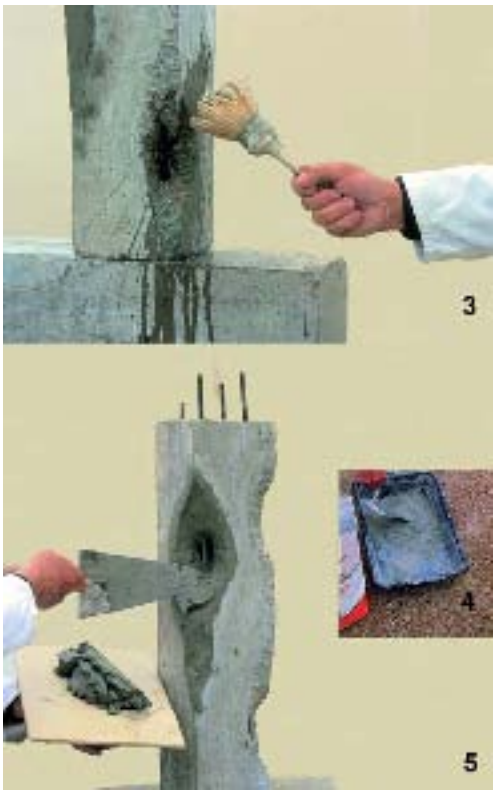


Photo n° 73 phases 3, 4 et 5 d'une réparation par enlèvement du béton pollué (crédit photo Parexlanko)

Photo n° 74 réparation par enlèvement du béton pollué terminée

Les divers traitements de protection des armatures :

Il y a lieu de rappeler que les **armatures doivent être débarrassées de toute trace de corrosion,** en particulier **lors d'une réparation localisée** à la jonction entre les parties reconstituées et les parties laissées intactes. En effet, la partie réparée, qui était une zone anodique, en bénéficiant d'un pH élevé (12 à 13), peut devenir une zone cathodique et **risque de former une pile de corrosion très réactive** avec la partie encore corrodée de l'armature mais enrobée d'un béton au faible pH. **Les divers traitements de protection des armatures ont pour but de limiter ce risque.**

Photo n° 75 : armatures débarrassées de toute trace de corrosion au pont de Limay (crédit photo D. Poineau)

> La protection des armatures est aussi indispensable :

- lorsque l'enrobage, après réparation, ne peut respecter la valeur nécessaire pour résister à l'agressivité de l'environnement (se reporter, par exemple, aux enrobages prescrits par les règles de calcul du béton armé…),

Rappel : certaines techniques de reconstitution d'enrobage, comme le béton projeté par voie sèche, sont incompatibles avec la mise en œuvre d'un traitement de protection des armatures contre la corrosion. En effet, dans le cas du béton projeté, la puissance d'impact de la projection détruit le traitement.

Nota : *lorsque l'enrobage ne peut être respecté sur une grande partie d'une pièce ou lorsque la pièce est exposée à un environnement particulièrement agressif (par exemple, les corniches d'un pont en montagne), il est aussi possible de prévoir le remplacement* ***des armatures concernées par des armatures galvanisées ou des armatures en acier inoxydable d'une nuance adaptée à l'environnement, voire des armatures composites.***

- **lorsque le produit de réparation ne peut apporter le pH indispensable au maintien de la passivation des armatures.** C'est le cas des mortiers de réparation à base de résines synthétiques qui ont un pH voisin de 7.

La protection des armatures avant reconstitution de l'enrobage peut être assurée par :

■ l'application sur la totalité de la circonférence de l'armature d'un revêtement actif au sens de la norme **NF EN 1504-7**, c'est-à-dire d'un revêtement contenant des pigments actifs permettant un contrôle des zones anodiques :

- inhibiteurs anodiques (il existe une controverse sur leur effet à long terme),

- pigments métalliques ayant un potentiel d'électrode plus faible que l'acier et qui se sacrifient à son profit en cas de corrosion…,

■ l'application sur la totalité de la circonférence de l'armature d'un revêtement étanche au sens de la norme **NF EN 1504-7,** c'est-à-dire d'un revêtement isolant l'armature de l'eau interstitielle et empêchant ainsi «les cations fe» de s'échapper et «les anions» entrants de se décharger :

- revêtements à base de résines synthétiques, dont l'utilisation pour une réparation comme pour un ouvrage neuf est très délicate (se reporter au rappel qui suit).

Photo n° 76 : application d'un revêtement anticorrosion sur des armatures de BA (crédit photo Weber et Broutin)

Rappel : *la mise en œuvre* ***d'un revêtement étanche*** *sur les armatures (produit à base d'une résine synthétique) impose que l'armature soit totalement revêtue. Dans le cas contraire (mauvaise application ou blessure sur le chantier), il peut se former au droit d'une solution de continuité* ***une corrosion par piqûre*** *qui se développera vers l'intérieur* ***par une corrosion dite «caverneuse»*** *(pile d'aération différentielle) et qui entraînera la destruction de l'armature sous le revêtement de protection…*

3.2.6.3.3.2 Deuxième méthode : la protection cathodique

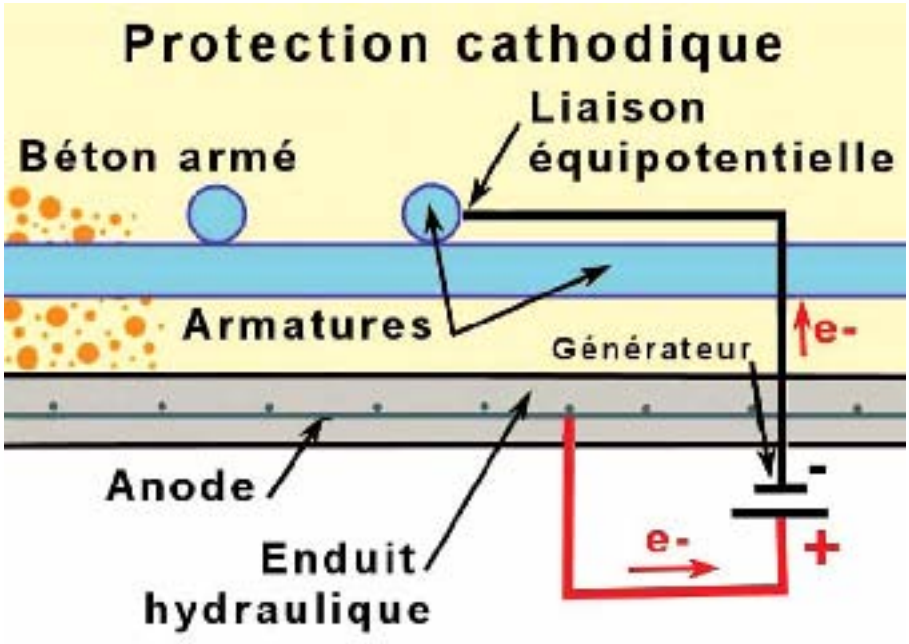


Figure n° 26 : principe de réalisation d'une protection cathodique par courant imposé

La protection cathodique consiste à abaisser le potentiel d'une armature de façon à ce que sa vitesse de corrosion devienne négligeable. Elle fait l'objet de la norme **NF EN 12696 :** Protection cathodique de l'acier dans le béton. Cette norme concerne uniquement **les bétons exposés à l'atmosphère.** Cependant, **le présent guide indique les solutions possible dans le cas des bétons immergés ou au contact d'un sol.**

Cette norme ne traite pas de la conception d'une installation de protection cathodique, elle a uniquement un caractère d'exigence des résultats.

La protection cathodique peut être appliquée sur des ouvrages neufs ou des ouvrages existants qui ne présentent aucune corrosion. Dans ce cas, la protection cathodique a pour rôle **la préservation de la passivité des armatures.** Dans le cas contraire, si la corrosion est développée, la protection cathodique a pour rôle **la restauration de la passivité des armatures.**

Cette technique, en particulier par courant imposé, n'est utilisée que pour des structures importantes (par exemple, les piles du viaduc d'accès à l'île de Noirmoutier), à cause des contraintes d'entretien et de surveillance qu'elle impose ainsi que de l'importance de son coût de mise en œuvre.

> La protection cathodique peut être réalisée :

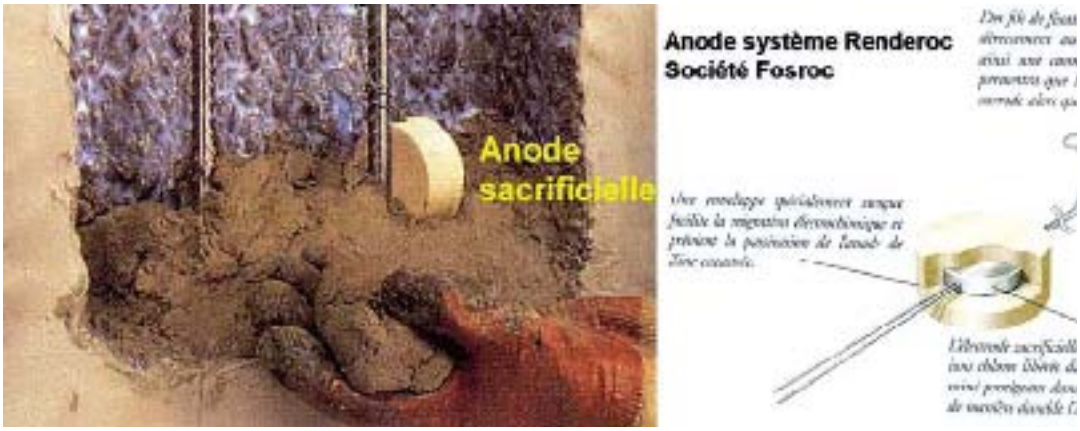


Photo n° 77 : protection galvanique (crédit photo Fosroc)

- **par protection galvanique (anciennement appelé protection par anodes sacrificielles),** c'est-à-dire au moyen **d'une anode active,** en général en zinc, placée sur le parement (par exemple, film de zinc sur la totalité de la surface de la pièce à protéger) ou dans l'enrobage (sous forme de pastilles) et reliée directement à l'armature (création d'un courant galvanique) ;

- **par courant imposé au moyen d'un générateur électrique qui impose un courant circulant de l'anode (classiquement un treillis en titane disposé sur toute la surface de la pièce à protéger et enrobé dans un matériau à base de liants hydrauliques) vers l'armature reliée électriquement à l'anode.**

Nota : *en simple* ***prévention cathodique*** *(armatures non encore touchées par la corrosion), la densité de courant nécessaire varie entre 0,2 mA/m² et 2 mA/m². En* ***protection cathodique,*** *elle varie entre 2 mA/m² et 20 mA/m².*

La protection cathodique au moyen d'un générateur électrique qui est réglable est plus facile à maîtriser que la protection cathodique au moyen d'anodes actives, puisque la circulation du courant va dépendre de **la résistivité du béton,** qui varie aussi en fonction des conditions atmosphériques (humidité ou sécheresse).

> La méthode visée par la norme s'applique :

- après restauration des zones présentant des délaminations et l'enlèvement de la calamine et de la rouille non adhérentes (le béton intact, même carbonaté ou chloruré, n'a pas à être restauré) ;

- la continuité électrique de toutes les armatures de la zone à traiter doit être assurée ;

- tous les objets métalliques électriquement isolés du circuit doivent être enlevés ou raccordés au circuit ;
- aux structures précontraintes **s'il n'y a pas de risque de fragilisation des aciers par l'hydrogène.** Il est donc nécessaire de faire des essais préalables (consulter un laboratoire spécialisé) ;

> Elle ne s'applique pas :

- aux structures enterrées et immergées (voir la suite du texte) ;
- si une alcali-réaction a été détectée, la protection cathodique risquant d'accélérer le phénomène mais, normalement, le traitement ne déclenche pas une alcali-réaction si les **exigences de la norme** sont respectées.

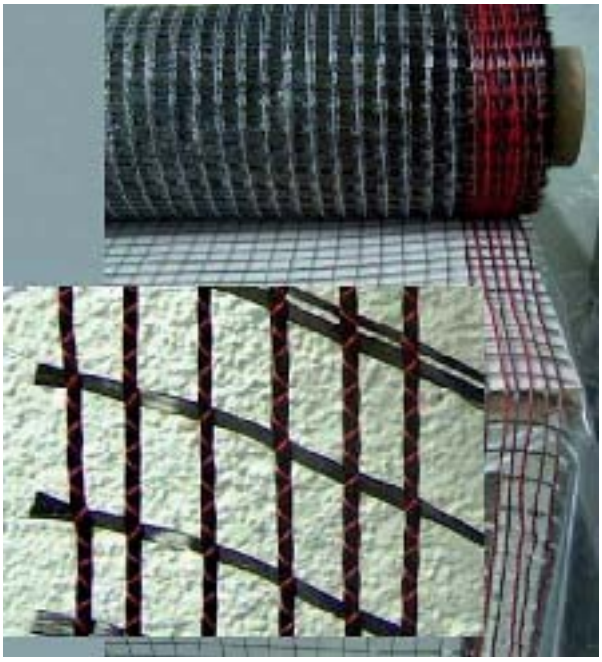


Photo n° 78 : anode en carbone (crédit photo Maxit France - Procédé Carbocath)

> La norme classe les anodes, appelées «ensembles anodiques», en deux catégories :

- **les ensembles anodiques à revêtements conducteurs :**

  - de types organiques : revêtements conducteurs à base de carbone auxquels s'ajoutent les conducteurs (anodes primaires) intégrés aux revêtements ou fixés à leur surface,
  - de types métalliques : revêtements sous forme de films de zinc mis en œuvre par métallisation auxquels sont reliés les conducteurs par des plaques de fixation ;

■ **les ensembles anodiques en titane activé :**

- sous forme d'un treillis placé à la surface du béton et enrobés dans un mortier à base de liants hydrauliques,

- sous forme de bandes pleines ou maillées placées dans des rainures pratiquées à la surface du béton et qui sont ensuite rebouchées au moyen d'un mortier à base de liants hydrauliques,

- sous forme :
. d'anodes intégrées dans la structure, dans des trous forés dans le béton puis rebouchés par un mortier à base de liants hydrauliques,
. d'anodes avec un enrobage conducteur à base de graphite (carbone),
. d'anodes noyées dans le béton de réparation.

Nota : *d'autres ensembles anodiques peuvent être utilisés mais ne sont pas d'un usage courant. Se reporter* ***à l'annexe C informative de la norme.***

Cette classification des ensembles anodiques n'est pas liée aux notions d'anode sacrificielle ou de courant imposé.

Il y a lieu d'attirer l'attention des maîtres d'œuvre et des entrepreneurs sur les durées de vie estimées des différents systèmes anodiques figurant dans l'annexe informative C de la norme.

Types d'ensembles anodiques	Durée de vie potentielle
Revêtements organiques conducteurs	5 à 15 ans
Revêtements métalliques	5 à 15 ans
Titane activé	25 à 100 ans

Tableau n° 14 : durées de vie des différents systèmes anodiques

> Dans le cas de structures immergées ou enterrées, la protection cathodique est possible :

Photo n° 79 : anode extérieure sur un pieu métallique (crédit photo Grimaldi)

■ **Protection par anodes solubles :**

- dans les zones d'éclaboussures et de marnage, seules les **anodes internes** ou **les anodes extérieures protégées par une coque** peuvent être utilisées,

- dans les zones immergées, une anode extérieure peut être mise en place ;

■ **Protection par courant imposé :**

- dans toutes les zones (d'éclaboussures, de marnage et immergées), ce type de protection est applicable.

3.2.6.3.3.3 Troisième méthode : la déminéralisation électrochimique et la ré-alcalinisation électrochimique

La déminéralisation électrochimique a pour but d'extraire les chlorures du béton et la ré-alcalinisation électrochimique a pour but d'augmenter le pH du béton. Ces types de traitement sont temporaires, d'une durée d'application de quelques semaines (4 à 5 pour une déchloruration et 2 à 3 pour une ré-alcalinisation). **Seule la ré-alcalinisation fait l'objet d'un fascicule de documentation européen FD CEN/TS 14038-1.** Ces méthodes de traitement font l'objet de divers brevets.

L'expérience montre que la déminéralisation n'est jamais totale : seuls 50 à 80% des chlorures peuvent être éliminés. C'est suffisant si le taux en chlorures passe en dessous du seuil critique (environ 0,1% du poids de ciment). Dans le cas contraire une autre campagne s'impose

> Ces opérations peuvent être réalisées :

■ **1ère procédé :** au moyen **d'une anode active** directement reliée à l'armature (création d'un courant galvanique). Dans un tel cas, la déchloruration et la ré-alcalinisation peuvent être effectuées en même temps ;

■ **2ème procédé :** au moyen **d'un générateur électrique** qui impose un courant circulant de l'anode vers l'armature. Dans un tel cas, la déchloruration et la ré-alcalinisation sont effectuées l'une après l'autre ;

Photo n° 80 : déminéralisation et ré-alcalinisation par anode active (crédit photo Freyssinet)

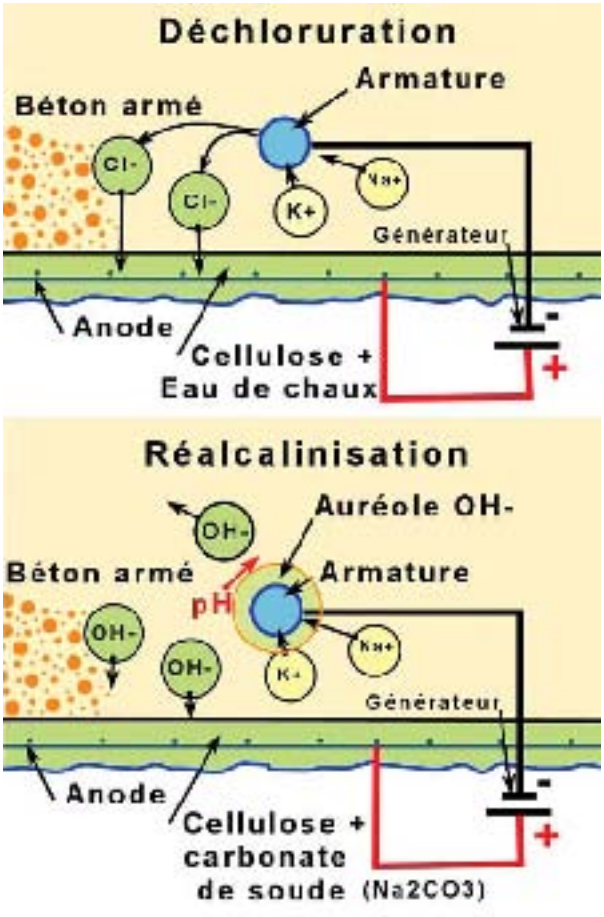


Figure n° 27 : principes de la déchloruration et de la ré-alcalinisation par courant imposé

Dans les deux procédés, une couche de pâte imbibée d'une solution électrolyte adaptée est appliquée sur la surface de la pièce à traiter (elle doit être humidifiée périodiquement pour permettre la circulation du courant électrique). L'anode (grille métallique) est reliée aux armatures de la structure à traiter (cette jonction passe par l'intermédiaire du générateur de courant continu dans le second procédé).

Les traitements doivent être précédés de la restauration des zones présentant des délaminations avec enlèvement de la calamine et de la rouille non adhérentes.

La continuité électrique de toutes les armatures de la zone à traitée doit être assurée et tous les objets métalliques électriquement isolés du circuit doivent être enlevés ou raccordés au circuit.

La méthode de ré-alcalinisation visée par le **FD CEN/TS 14038-1** ne s'applique pas aux structures précontraintes **car il n'y un risque de fragilisation des aciers par l'hydrogène.** Il est donc nécessaire de faire des essais préalables avant toute expérimentation sur une structure précontrainte.

ATTENTION, ***les deux procédés ne s'appliquent que si la profondeur de carbonatation, ou celle de pénétration des chlorures d'origine externe, ne dépasse pas l'épaisseur de l'enrobage[33].*** *De plus, la déchloruration n'est pas possible si le béton est totalement saturé en sel.*

Si le béton contient **des granulats potentiellement réactifs** vis-à-vis de l'alcali-réaction, il est déconseillé d'utiliser ces procédés sans essais préalables.

Après une déchloruration,, non suivie d'une ré-alcalinisation, pour permettre la restauration de la passivité des armatures, il faut que le béton puisse sécher dans une atmosphère où le degré d'humidité (HR) ne dépasse pas 50%. Le traitement doit être fait en période favorable à cet assèchement.

ATTENTION, *après réparation, il est indispensable* ***de protéger le béton par un revêtement*** *puisque les agents agressifs peuvent de nouveau pénétrer dans le béton après l'arrêt des traitements électrochimiques.*

3.2.6.3.3.4 Quatrième méthode : la mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion à la surface du béton

Les inhibiteurs de corrosion sont, en général, utilisés dans le **béton frais** lors de la construction d'ouvrages neufs. Ils sont appliqués couramment **à la surface des armatures** de béton armé débarrassées de la rouille avant de mettre en œuvre un mortier de ragréage comme indiqué **dans la partie 3.2.6.3.3.1 ci-devant.**

Cependant, certains produits peuvent aussi être déposés à la surface des bétons et migrer vers les armatures assurant ainsi la protection contre la corrosion sans nécessiter au préalable la ré-alcalinisation du béton, voire sa déchloruration.

> Les inhibiteurs de corrosion appartiennent, d'après le guide de novembre 2003 de l'AFGC, aux trois groupes suivants, en fonction de leur mode d'action :

- **les inhibiteurs anodiques** (inhibiteurs de type passivant dits aussi oxydants), qui diminuent le courant de corrosion à la surface de l'armature sur la partie anodique (zone de corrosion) en transformant l'oxyde ferreux en une couche d'oxyde ferrique, créant sur celle-ci une couche compacte d'oxyde de fer. Il est nécessaire que le produit soit présent en quantité suffisante au niveau de l'armature, sinon le film n'est pas assez épais et il peut se produire une corrosion localisée. Ces produits sont utilisés couramment comme additif dans le béton frais, mais sont d'application délicate sur le béton durci ;

- **les inhibiteurs cathodiques,** qui sont subdivisés, par d'autres auteurs, en deux catégories :

  - **les inhibiteurs d'adsorption,** qui réduisent le courant au niveau de la cathode en formant une couche adhérente à la surface de l'armature. Ils ne bloquent pas totalement la corrosion mais ne provoquent pas de corrosion localisée. Ces produits sont généralement des composés organiques,

  - **les inhibiteurs non oxydants,** qui augmentent la surtension cathodique et réduisent ainsi le courant de corrosion (sorte de barrière électrochimiques d'ions). Ils sont souvent complétés par un produit minéral qui forme un film à la surface de l'armature par adsorption (par exemple, une phosphatation) ;

- les inhibiteurs mixtes, qui ont les propriétés des deux inhibiteurs susvisés.

[33] En cas de ré-alcalinisation, si la profondeur de carbonatation dépasse les armatures proches de la surface, le traitement doit prendre en compte les armatures plus profondes (profondeur maximale ≤ 20 cm).

Avant de mettre en œuvre un tel traitement, il est indispensable de vérifier (lors des investigations préalables) que la corrosion des armatures n'a pas commencé à provoquer, par gonflement de la rouille, des décollements entre les aciers et le béton (délamination).

Les inhibiteurs appliqués à la surface du béton nécessitent une préparation de surface préalable destinée à enlever tout revêtement de peinture existant, mais aussi, en enlevant la laitance présente en surface, à ouvrir les pores du béton pour faciliter la pénétration du produit. De plus, au fur et à mesure de leur mise en œuvre, la pénétration des produits doit être contrôlée. Il est rappelé qu'un béton non carbonaté bloque la pénétration des inhibiteurs.

Il y a donc lieu de faire **un essai de convenance** pour mettre au point le traitement de surface et les conditions d'application du produit.

Photo n° 81 : application d'un inhibiteur de corrosion à la surface du béton (crédit photo Parexlanko)

Enfin un tel traitement doit être complété par **la mise en œuvre d'un revêtement de protection** pour limiter la pénétration des agents agressifs toujours présents dans l'environnement de l'ouvrage.

Il convient, en outre, de signaler que, s'il est possible de s'assurer de la pénétration des inhibiteurs par un prélèvement destructif, il n'y a pas à ce jour d'essai pour mesurer l'efficacité de ces produits et la durée de leur action. En effet, les différents essais visés par le guide d'application de **l'AFNOR GA P 18-902** ne permettent pas de caractériser les effets de ces produits. La série des normes européennes **NF EN 1504-* *** ne couvre pas l'utilisation des inhibiteurs. **En résumé, il n'existe aucune norme européenne ou française ni d'Avis Technique traitant de ce sujet.**

> Les principales conclusions provisoires des études effectuées dans le cadre du programme européen de recherche COST 521 sont les suivantes :

- il n'est pas évident que les inhibiteurs puissent réduire de façon significative la vitesse de corrosion des armatures **en présence de chlorures** dans le béton (lorsque la concentration en chlorures d'un béton est élevée, le développement de la corrosion peut même s'accélérer) ;
- en présence de carbonatation, les résultats des essais sont plus prometteurs.

La Commission Construction Bâtiment du CEFRACOR (www.concretecorrosion.net) n'a pu émettre un avis motivé sur l'efficacité des inhibiteurs de corrosion dans le béton armé. Dans son avis de janvier 2006, elle a simplement émis les recommandations suivantes en cas d'utilisation de ces produits :

- l'essai de convenance sur site doit comporter trois planches d'essais avec trois concentrations de produits ;
- des prélèvements doivent être effectués pour connaître la concentration du produit autour des armatures…

Durée des responsabilités et garanties : il convient de se reporter au guide technique de 2002 du LCPC qui fixe, pour ces produits, une durée de garantie de 10 ans. Un suivi sur plusieurs années des effets du produit utilisé sur l'évolution de la corrosion des armatures est donc à prévoir (se reporter à l'article 5.4.3.5.4 qui traite des contrôles d'exécution).

Photo n° 82 : guide du LCPC sur la protection des bétons de 2002 (crédit photo CERI-SERP)

En conclusion : lorsque l'utilisation d'un inhibiteur est envisagée, il est indispensable de prendre l'avis d'un conseil compétant et de prévoir, d'une part, **une qualification de l'état du support** avec essais chimiques sur un béton carbonaté et/ou un béton chloruré à divers taux et, d'autre part, **un essai de convenance** permettant de s'assurer de la pénétration du produit... Une telle réparation reste du domaine expérimental.

> De plus, il convient de se rappeler que :

- les inhibiteurs à base de nitrites ne sont pas utilisables sur des bétons soumis au gel/dégel;
- si la teneur en chlorures du béton dépasse un certain seuil (au-delà de 0,6 à 0,8% du poids de ciment), certains inhibiteurs peuvent devenir inactifs, voire accélérer la corrosion.

ATTENTION, *après réparation, il est souhaitable* ***de protéger le béton par un revêtement*** *puisque les agents agressifs peuvent à nouveau pénétrer dans le béton.*

Cet article traite des produits et systèmes concernant, d'une part, **la fonction de réparation non structurale et la fonction de réparation structurale (avec ou sans renforcement) et, d'autre part, la fonction de préservation ou de restauration de la passivité des armatures.**

Bien que certains produits et systèmes puissent assurer les trois fonctions à la fois, pour des raisons pratiques, **un sous-article est consacré aux deux premières fonctions et un autre à la troisième.**

> Cet article est constitué de sous-articles traitant des points suivants :

- des généralités ;
- des critères de choix communs à tous les produits et systèmes de réparation ;
- des critères de choix spécifiques aux produits et systèmes de réparation structurale et non structurale,
- des critères de choix spécifiques aux produits et systèmes de préservation ou de restauration de la passivité des armatures,
- des exigences concernant les constituants des produits et systèmes de réparation et des produits connexes,
- de l'épreuve d'étude.

> Lors de certaines réparations et encore plus lors des renforcements, il y a lieu de mettre en œuvre des mortiers et bétons qui doivent satisfaire aux exigences du maître d'ouvrage (la construction d'un ouvrage neuf pose les mêmes problèmes). Par exemple, les exigences peuvent porter sur les points suivants :

- la durabilité vis-à-vis de la corrosion ;
- la résistance à des attaques physiques (érosion…) ou chimiques (eaux acides…) ;
- la durabilité vis-à-vis des effets du gel-dégel en présence ou non de sels de déverglaçage ;
- l'absence de réactions de gonflement internes (alcali-réaction [AR] ou réaction sulfatique interne [RSI]) ;
- la prise en compte des effets des différents retraits (thermique, endogène, de dessiccation au jeune âge ou à long terme) pour éviter la fissuration de surface ;
- l'obtention des propriétés mécaniques (résistance, module de déformation, coefficient de fluage…) ;
- l'obtention de la qualité des parements (homogénéité de teinte, absence de ressuage et de nids de cailloux…)…

L'expérience montre que ces exigences peuvent avoir des effets contradictoires, ce qui peut provoquer, soit des retards sur le chantier à cause des délais nécessaires pour trouver des solutions, soit l'apparition de désordres ultérieurs dans les bétons et/ou les armatures s'il s'avère impossible de prendre le temps nécessaire aux études.

Par exemple, la résistance d'un béton au gel-dégel peut être obtenue en adoptant un fort dosage en ciment, ce qui peut entraîner le maintien du béton à température élevée pendant une longue période durant son durcissement. La température est le facteur principal d'un possible développement ultérieur d'une RSI si :

- le ciment est fortement exothermique ;
- le bétonnage a lieu par temps chaud ou un traitement thermique est appliqué ;
- la pièce est massive (parfois sur des pièces de moins de 0,50 m x 0,50 m de section, en cas d'un bétonnage par temps très chaud ou d'un traitement thermique sévère).

Pour empêcher la réaction de se développer, **l'ajout de cendres volantes** serait bénéfique, mais il est en fait fortement déconseillé à cause du gel.

Des solutions sont cependant possibles pour satisfaire les deux exigences susvisées, mais leur mise en œuvre peut nécessiter des délais d'études importants (par exemple, six à huit mois sont nécessaires pour effectuer des essais de gonflement dits de performance).

Il est donc indispensable, dans de tels cas, que **le marché prévoit une période de préparation des travaux** suffisamment longue pour pouvoir effectuer toutes les études nécessaires afin de satisfaire les exigences potentiellement contradictoires.

Pour résumer, le principe suivant doit être respecté : il faut s'assurer lors du choix des produits et systèmes **qu'ils sont compatibles** avec le béton et les armatures de la structure existante.

3.3.1 GÉNÉRALITÉS

Les deux critères communs, la spécificité du travail à exécuter d'une part, et la protection de la santé, le respect des règles de sécurité, la protection de l'environnement d'autre part, sont relatifs au choix des produits et systèmes de réparation structurale ou non et de conservation ou de restauration de la passivité des armatures. Ils sont développés ci-après dans les deux articles 3.3.2.1 et 3.3.2.2 au-dessous.

> Il existe également des critères de choix spécifiques. En effet, pour une fonction de réparation ou de renforcement exigée, plusieurs types de produits et de systèmes peuvent être utilisés. Par exemple, la norme européenne NF EN 1504-4 relative au collage structural distingue plusieurs types de collage faisant chacun appel à des produits spécifiques, qui peuvent avoir pour une caractéristique donnée plusieurs niveaux de performance :

- le collage des plaques extérieures en acier ou tout autre matériau approprié ;
- le collage de béton durci sur béton durci ;
- le collage de béton frais sur béton durci.

Il appartient **au marché** de fixer la ou les familles de produits et systèmes utilisables, les caractéristiques et les niveaux de performance auxquelles doivent satisfaire ces produits et systèmes ainsi que les contraintes d'exécution de l'opération.

L'entrepreneur propose à l'acceptation **du maître d'œuvre** les produits ou systèmes capables de satisfaire les exigences **du marché. Les produits et systèmes ne sont définitivement retenus qu'au vu des résultats satisfaisants de l'épreuve d'étude et de convenance. L'acceptation des produits admis à une marque de certification est développée à l'article 5.2.2.1 au-dessous relatif aux contrôles d'exécution.**

Prise en compte du marquage CE dans le choix des produits et systèmes de réparation ou de renforcement des structures en béton : ces produits et systèmes doivent présenter certaines des caractéristiques exigées par la série des normes **NF EN 1504-* *** (rappel, le niveau de performance n'est pas imposé). De plus leur système d'attestation de conformité doit appartenir, soit à la classe 4 qui concerne les produits avec des exigences de performance peu élevées, soit à la classe 2+ dans le cas contraire. En outre, s'ils doivent satisfaire à **une réglementation en matière de réaction au feu,** leur système d'attestation de conformité doit appartenir, suivant le niveau de performance nécessaire, aux classes 1, 2 ou 3. **En conclusion, le marché doit fixer les niveaux de performance comme les niveaux des systèmes d'attestation de conformité.**

Les rédacteurs du présent guide se sont posé la question suivante : faut-il traiter séparément **les domaines du bâtiment et du génie civil ?** L'examen des textes de référence a permis de faire les propositions suivantes.

DANS LE DOMAINE DU BÂTIMENT

À cause des **obligations d'assurance,** les procédures de mise en œuvre des différents produits dans le domaine du bâtiment doivent, soit satisfaire aux dispositions **des DTU,** qui ont été transformés en normes depuis quelques années, soit faire l'objet **d'exigences dans le cadre d'un cahier des prescriptions techniques du CSTB complétées par des Avis Techniques ou des certifications CSTbat.** Ce principe est applicable aussi bien pour la réalisation **des ouvrages neufs** que pour **la réhabilitation et les réparations sous réserve que les textes existent et** que l'opération prévue s'inscrive bien dans **le domaine d'application** couvert par ces différents documents.

> Par exemple, dans le domaine de la reprise des bétons dégradés, le nouveau DTU 42.1 (norme NF P 84-404) dans son annexe B (normative) ne traite que des réfections locales des bétons éclatés par suite de l'oxydation des armatures à caractère non structural. Il faut donc séparer les domaines du bâtiment et du génie civil sur les points suivants :

- les ragréages de type bouche-pores visés par l'article 6.2.1 du **DTU ;**
- les ragréages de défauts de surfaces visés par l'article n°6.1.1 qui n'ont pas pour objet de corriger les défauts de planéité (sauf clause particulière dans **les DPM) ;**

- les ragréages lorsqu'une adhérence ≥ 0,3 MPa est exigée ;
- les réparations faisant suite à l'oxydation des armatures.

En revanche, il n'est pas nécessaire de faire la séparation pour **le domaine des réparations et des renforcements structuraux qui ne sont pas visés par les DTU ou les avis techniques.**

En conclusion, les DPM peuvent, en s'inspirant du présent guide, compléter, en tant que de besoin, par exemple les clauses **du DTU 42.1.** Il convient cependant de prendre en compte **certaines contraintes spécifiques au bâtiment telles que le niveau de tenue au feu,** sans oublier **les obligations liées aux assurances...**

DANS LE DOMAINE DU GÉNIE CIVIL

Le fascicule 65 A du CCTG et son additif s'appliquent **aux ouvrages neufs de génie civil** en béton armé ou précontraint. Cependant, dans **le cadre de l'assurance et du contrôle de la qualité,** l'article 23 précise que **le traitement des imperfections et des non-conformités** relevées doit être effectué après acceptation de la procédure de reprise des défauts par **le maître d'œuvre.**

Ce souci de traiter des non-conformités se retrouve **à l'article 55.5 du chapitre 5,** qui traite des surfaces coffrées et des parements et des défauts d'aspect, **à l'article 65 du chapitre 6,** qui traite des armatures de béton armé et du respect des enrobages prescrits, **à l'article 76.3 du chapitre 7,** qui traite des bétons et du cas des lots non-conformes.

> De plus, le chapitre 10, relatif aux tolérances sur l'ouvrage fini et de l'achèvement de l'ouvrage, traite :

- **dans son article 10.2,** de la reprise des défauts de nature à porter atteinte à la qualité structurale, avec un développement sur la méthodologie que doit appliquer **l'entrepreneur** pour reconnaître les défauts, en expliquer les causes et proposer une solution de réparation, l'ensemble devant être soumis à l'acceptation **du maître d'œuvre ;**
- **dans son article 10.3,** des défauts d'aspect et des ragréages, avec un renvoi à l'article 55.5 qui traite de la reprise des défauts d'aspect.

> Enfin, le fascicule 65 A du CCTG et son additif précisent les positions classiques que peut prendre le maître d'œuvre sur la proposition de reprise des non-conformités remise par l'entrepreneur :

- accepter la solution de reprise des non-conformités avec ou sans compléments ;
- procéder à une réfaction de prix ;
- refuser la partie d'ouvrage concernée et faire procéder à une démolition suivie d'une reconstruction.

En aucun cas, les deux fascicules du CCTG ne traitent des techniques de réparations. Ils renvoient cependant aux textes existants, tels que **le guide technique de 1996** édité par **le LCPC** sur le choix des produits de réparation, à certaines des normes sur les produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydrauliques (produits de calage et de scellement…) Ils ne renvoient pas aux normes de la série **NF P 95-1**.**

En conclusion, puisque les deux fascicules du CCTG ne donnent aucune solution détaillée pour la reprise des défauts structuraux et d'aspect, **en cas de désordres sur un ouvrage en cours de construction, l'entrepreneur et le maître d'œuvre** peuvent se référer au présent guide. Il en est de même pour **la mise au point des projets de réparation ou de renforcement et des CCTP annexés. CE PRINCIPE EST ÉGALEMENT VALABLE POUR LES AUTRES GUIDES STRRES.**

Dans la suite de ce document, **pour les deux domaines que sont le bâtiment et le génie civil, les fonctions spécifiques** sont donc explicitées, **les textes de référence** sont cités et l'incidence **de la normalisation européenne** est abordée dans le détail…

3.3.2 CRITÈRES DE CHOIX COMMUNS À TOUS LES PRODUITS ET SYSTÈMES DE RÉPARATION

3.3.2.1 Critères de choix liés aux spécificités du travail à exécuter

Le produit ou le système de réparation ou de renforcement doit être adapté **aux spécificités du travail à exécuter.** Les normes de référence listées ci-après n'étant pas forcément très explicites sur ce sujet, il faut les décrypter afin de fixer les exigences ad hoc dans **le marché :**

3.3.2.1.1 Cas des normes françaises

- la norme homologuée **NF P 95-101,** qui vise essentiellement **l'exécution des réparations des dégradations superficielles,** met surtout en évidence l'importance de la préparation des surfaces à réparer et son incidence sur le choix des produits de réparation. Elle évoque cependant les contraintes d'environnement et d'exploitation actuelles et futures susceptibles de dégrader les réparations, telles que les cycles de gel-dégel, le salage… les contraintes d'accès aux ouvrages à réparer ou à renforcer, les contraintes d'emprises de chantier, les contraintes liées à la protection contre les nuisances, pollutions et contaminations , les contraintes liées au trafic et au maintien en exploitation (vibrations, déformations…). Elle évoque aussi certaines difficultés d'exécution avec les subjectiles poreux, la température ambiante basse ou élevée, les produits à base de résines qui adhèrent sur les coffrages…

Cette norme renvoie aux autres normes de la série pour les réparations structurales, à savoir la **NF P 95-102** (béton projeté) et la **NF P 95-103** (traitement des fissures et protection du béton). À ces deux normes, **traitant à la fois des produits et de l'exécution,** il convient d'ajouter les deux normes d'exécution suivantes : la **NF P 95-104** (précontrainte additionnelle) et la **NF P 95-105** (armatures passives additionnelles) qui n'a pas été rédigée[34].

[34] *Se reporter au n° 501 des annales de l'ITBTP de février 1992 dans la série technique générale de construction.*

Cette norme renvoie également à la norme **XP P 18-840** intitulée : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits ou systèmes de produits destinés aux applications superficielles sur béton durci – Caractères normalisés garantis (cf. **NF EN 1504-3).**

> D'autres normes de la série P 18-8[35] concernent aussi les produits de réparation :**

- **XP P 18-821 :** Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de calage et de scellement à base de liants hydrauliques – Caractères normalisés garantis **(cf. NF EN 1504-6 pour la fonction scellement seulement),**
- **XP P 18-822 :** Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de calage et de scellement à base de liants de résines synthétiques – Caractères normalisés garantis **(cf. NF EN 1504-6 pour la fonction scellement seulement),**
- **XP P 18-870 :** Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques pour collage structural entre deux éléments de béton – Caractères normalisés garantis **(cf. NF EN 1504-4),**
- **XP P 18-880 :** Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques pour injections dans les structures en béton – Caractères normalisés garantis **(cf. NF EN 1504-5),**

3.3.2.1.2 Cas des normes européennes

Il s'agit des normes de la série NF EN 1504-** listées ci-après et qui fixent dans leur annexe **«ZA»** les conditions du marquage **«CE».** Il est rappelé, que lorsqu'une réglementation en matière **de réaction au feu** est applicable aux produits et systèmes, les classes de performance doivent être fixées par **le marché.** Ces classes figurent explicitement sur **le marquage CE.**

Le texte ci-dessous permet de comprendre l'esprit des normes européennes, qui fixent des exigences de performances pour trois sortes d'applications.

- **la norme NF EN 1504-2,** qui traite des produits et systèmes **pour la protection de surface pour béton,** complète en tant que de besoin la norme **NF EN 1504-3** si la réparation nécessite la mise en œuvre d'une protection contre la pénétration d'agents agressifs, une résistance physique ou chimique…

ATTENTION, *cette norme, comme les autres normes de la série, vise les performances requises pour* ***«toutes les applications prévues»*** *(tous les produits doivent satisfaire ces exigences de base) et les performances requises pour* ***«certaines applications prévues»*** *(certains produits peuvent présenter en plus une résistance aux cycles de gel-dégel, une réaction au feu d'un niveau donné, une résistance à la fissuration…). Il faut donc fixer avec soin les exigences à satisfaire compte tenu de leur incidence sur le choix des produits et systèmes.*

[35] Rappel : les normes de la série ***NF EN 1504-**** *vont se substituer, en partie seulement, aux normes de la série* ***P 18-8*****.
Les ***normes XP P 18-821 et XP P 18-822*** *n'ont pas d'équivalent dans leur fonction calage.*

> La norme NF EN 1504-3, qui vise à la fois les produits et systèmes pour les réparations structurales et non structurales, fixe dans son tableau 1 :

- **les caractéristiques de performances requises pour toutes les applications prévues** (de base) auxquelles doivent satisfaire tous les produits et systèmes destinés à la restauration du béton ou à son renforcement ou à la préservation ou la restauration de la passivité (5 ou 6 caractéristiques sont concernées suivant l'usage). **Les caractéristiques et classes de performance chiffrées sont données par le tableau 3,**

- **des caractéristiques de performance complémentaires** à exiger par **le marché** pour **certaines utilisations prévues,** donc pour **des usages particuliers** (compatibilité thermiques [cycles de gel-dégel…], module d'élasticité [obligatoire en renforcement], la résistance au glissement [zones circulables], le coefficient de dilatation thermique [produits à base de résines de synthèse], absorption capillaire [limitation de la perméabilité à l'eau, en particulier pour empêcher la pénétration des chlorures). **Les caractéristiques et classes de performance chiffrées sont données par le tableau 3 ;**

ATTENTION, *la norme* ***NF EN 1504-3*** *vise aussi,* ***dans son annexe «B» informative, des «applications spéciales»*** *(dans le sens de* ***particulières****) qui imposent des essais pour satisfaire à* ***des caractéristiques non obligatoires*** *pour les produits et systèmes de réparation conventionnels (se reporter au Tableau n° 15).*

Tableau B.1 — Méthodes d'essai pour applications spéciales

Propriété	Méthode d'essai	Béton témoin	Commentaires
Pénétration d'ions chlorure	EN 13396		Valeur déclarée (Non requis lorsqu'un système de protection de surface est spécifié)
Fluage en compression [a]	EN 13584		Valeur déclarée
Résistance chimique	EN 13529 ou ISO 2812-1		Valeur déclarée (Non requis lorsqu'un système de protection de surface est spécifié)
Application en sous-face (par exemple, réparation en sous-face de madriers de ponts)	EN 13396-4	MC (0,40)	Il convient que la contrainte d'adhérence satisfasse à l'exigence de la ligne 3 du Tableau 3, en fonction de la classe.

a) Pour les mortiers PCC utilisés dans les applications structurales, cet essai n'est pas requis si on utilise comme critère de dimensionnement 50 % de la résistance à la compression à 28 jours.

Figure n° 28 photocopie du tableau B.1 de l'annexe B de la norme EN 1504-3 (noter la traduction inappropriée)

Le tableau n°3 de la norme **NF EN 1504-3** sépare les produits et systèmes **pour les deux types de réparations** (structurales et non structurales). En outre, il fixe **deux classes de caractéristiques de performance**[36] pour chacun **des deux types de réparation.** Il est donc nécessaire de choisir dans les quatre colonnes du tableau les caractéristiques de performance à imposer dans **le marché ;**

- la norme **NF EN 1504-4,** qui traite des produits et systèmes **pour le collage structural,** complète en tant que de besoin la norme **NF EN 1504-3** si la réparation nécessite le collage d'un mortier (frais ou durci) ou d'un béton (frais ou durci) sur du béton ou le collage d'armatures passives extérieures (plaques ou tissus) sur du béton. Cette norme vise **certaines applications prévues** (surfaces verticales ou sous-faces…) et dans son annexe A informative **des applications particulières,** ce qui peut avoir une incidence sur le choix des produits et systèmes ;

- la norme **NF EN 1504-5,** qui traite des produits et systèmes **pour l'injection du béton (fissures et vides),** complète en tant que de besoin la norme **NF EN 1504-3** si la réparation nécessite une injection de fissures ou de vides ou l'injection de l'interface entre le produit de réparation et/ou de renforcement et le béton de la structure. Cette norme vise **certaines applications prévues** (cas des produits à base de résines synthétiques…) et dans **son annexe B informative des applications particulières,** ce qui peut avoir des incidences sur le choix des produits et systèmes ;

- la norme **NF EN 1504-6,** qui traite des produits et systèmes pour **l'ancrage des armatures de béton armé,** complète en tant que de besoin la norme **NF EN 1504-3** si la réparation nécessite le scellement d'armatures de béton armé. Cette norme ne vise que des **applications prévues** et il n'y a pas **d'application particulière** en annexe ;

- la norme **NF EN 1504-7**, qui traite des produits et systèmes **pour la protection contre la corrosion des armatures,** complète en tant que de besoin la norme **NF EN 1504-3** s'il est nécessaire de préserver ou restaurer la passivité des armatures. **Les revêtements des armatures étant, soit actifs, soit étanches.** Cette norme ne vise que des **applications prévues** et il n'y a pas **d'application particulière** en annexe ;

- la norme **NF EN 1504-8,** qui traite de la maîtrise de la qualité et de l'évaluation de la conformité, vise essentiellement **l'assurance de la qualité de la fabrication des produits et systèmes.** Elle ne traite pas des spécificités du travail à exécuter et de leurs incidences sur le choix des produits et systèmes ;

- la norme expérimentale **XP ENV 1504-9** (en cours de révision), qui traite des principes généraux d'utilisation des produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton, explicite les différents **principes concernant la protection et la réparation et les méthodes utilisables pour satisfaire les principes.** Ces méthodes peuvent être utilisées, soit pour traiter des défauts du béton (6 principes en cause), soit pour traiter la corrosion des armatures (5 principes en cause).

[36] *Il est rappelé que* ***le marquage CE*** *fixe des valeurs seuils, des valeurs déclarées mais n'impose pas de classe de performance sauf en matière de réaction au feu.*

Cette norme traite également dans son article 5.3 **des facteurs** à prendre en compte lors du choix des actions à entreprendre après l'expertise de la structure telles que : ne rien faire, réparer, renforcer, démolir et reconstruire… . Parmi **les facteurs** qui relèvent **des spécificités du travail à exécuter,** il est possible de citer :

- facteurs généraux : les propriétés et les méthodes de préparation du support, l'aspect de la structure après travaux,
- facteurs liés à la santé et à la sécurité : l'impact de l'opération sur les usagers, les tiers et l'environnement,
- facteurs structuraux : l'impact des actions appliquées à la structure pendant les travaux (déformations et vibrations…),
- facteurs environnementaux : l'impact des intempéries, des agents agressifs… dont il convient de se protéger durant les travaux…

Nota : *bien entendu, si la plupart des méthodes sont reprises dans le présent guide, elles n'y sont pas détaillées. Par exemple, pour le traitement des fissures, il faut se reporter au* ***GUIDE N°3 [FABEM].***

- la norme **NF EN 1504-10,** qui traite de **l'application sur site** des produits et systèmes et **du contrôle de la qualité des travaux,** vise dans **ses exigences générales des articles 5 et 8** la nécessité de prendre en compte : l'état chimique, électrochimique et physique du support, les contaminants éventuels, la capacité de la structure à supporter les charges, les vibrations, les conditions ambiantes (température, humidité de l'air, précipitations, vent, ensoleillement…), etc. **Elle ne traite pas dans le détail des spécificités du travail à effectuer** et de leurs incidences sur le choix des produits et systèmes.

ATTENTION, *le tableau ci-dessous liste pour l'ensemble des normes de la série* ***NF EN 1504-***** *relatives au produits (1504-2 à 1504-7) les caractéristiques qu'ils doivent présenter pour* ***certaines applications prévues*** *(les essais de performance ne sont requis que si les produits sont formulés pour ces applications) et pour* ***des applications particulières,*** *ces dernières nécessitent des essais de performance spécifiques non imposés par les normes (essais à prévoir, par exemple, lors de* ***l'épreuve d'étude).***

Il est possible dans ***un marché*** *d'imposer :*
- des niveaux d'exigences plus sévères que ceux de la norme, par exemple dans le cas où les conditions thermiques sur le chantier diffèrent des valeurs retenues par la norme ;
- des exigences particulières, par exemple dans le cas où un produit doit être appliqué sous l'eau…

norme	Certaines applications prévues	Applications particulières	Norme d'essai pour les applications particulières
1504-2 Systèmes de protection	Se reporter au tableau n°1 de la norme impossible à synthétiser	RAS	
1504-3 Réparations structurales et non structurales	Se reporter au tableau n°1 de la norme impossible à synthétiser	Tableau B1	
		Pénétrations d'ions chlorure (présence de chlorures en l'absence d'un revêtement de protection adapté)	NF EN 13396
		Fluage en compression pour les produits PCC en applications structurales et un taux de travail > 60% f_{c28}	NF EN 13584
		Résistance chimique en l'absence d'un revêtement de protection	NF EN 13529 ou NF EN ISO 2812-1
		Application en sous-face	NF EN 13395-4
1504-4 Collage structural	Se reporter au tableau n°1. Le module d'élasticité en flexion (NF EN ISO 178) concerne le collage structural des armatures additionnelles extérieures ou des bétons (frais sur durci ou durci sur durci)	RAS	
	RAS	Fatigue sous charges dynamiques en phase de durcissement	NF EN 13894-1
	RAS	Fatigue sous charges dynamiques après durcissement	NF EN 13894-2
1504-5 Produits et systèmes d'injection	Produits (H) ou (P) transmettant un effort, se reporter au tableau n°1a		
	Produits (P) de remplissage ductile se reporter au tableau n°1b	En contact avec des inserts en polymères	NF EN 12637-3
		Soumis à des cycles thermiques, des cycles d'humidification et de séchage, voire au gel	NF EN 12618-1 ou NF EN 13687-3
	Produits (P) de remplissage expansif se reporter au tableau n°1c	En contact avec des inserts en polymères	NF EN 12637-3
		Soumis au gel	ISO 11357-3
1504-6 Ancrage des armatures en acier	Tableau 1, cas des produits à base de polymères :	RAS	RAS
	Température de transition vitreuse		
	Fluage en traction		
1504-7 Protection contre la corrosion des armatures	Tableau 1 :	RAS	RAS
	Protection contre la corrosion pour les revêtements étanches		
	Température de transition vitreuse pour les produits à base de résines de synthèse		
	Adhérence par cisaillement (acier revêtu sur béton)		

Tableau n° 15 : tableau récapitulatif de certaines applications prévues et des applications particulières

3.3.2.1.3 Conclusions sur les critères de choix des produits

> Il est nécessaire que le choix du produit ou système de réparation ou de renforcement prenne en compte, suivant le cas :

■ Critères généraux :

- le contexte : **bâtiment** ou **ouvrage de génie civil,** qui impose des niveaux de performances plus ou moins élevés, des exigences réglementaires de tenue au feu, des durées des responsabilités et garanties … ;

- **le caractère structural ou non** de la réparation, sachant **qu'un renforcement a toujours un caractère structural ;**

Note : *un ragréage d'épaisseur supérieur à l'enrobage et/ou de surface importante dans une zone soumise à des contraintes importantes peut avoir un caractère structural. Si le béton de la structure présente une résistance élevée, les produits ou systèmes à utiliser visés par la norme* ***NF EN 1504-3*** *seront choisis dans les classes R3 ou R4 qui relèvent du caractère structural.*

Le caractère d'une réparation *doit être déterminé lors de des études, mais la découverte lors des travaux, par exemple, d'une poche de gravillons cachée par la laitance, peut modifier au moins localement le caractère d'une réparation. Normalement, il faut limiter les excès d'enrobage non armés.*

■ **Critères particuliers :**

- la quantité de produits à utiliser (petite ou grande), laquelle peut orienter, à cause des coûts, vers des produits qui sont, soit prêts à l'emploi, soit fabriqués sur chantier,

- l'agressivité de l'environnement,

- les conditions ambiantes prévisibles sur le site,

- la présence d'eau avec ou sans pression (travaux souterrains, travaux sous-marins…),

- l'état du support, suivant que la réparation fait appel à un ragréage en faible ou en forte épaisseur, un bétonnage…,

- l'orientation du support, qui impose un travail au plafond, sur une surface verticale, sur un plan horizontal…,

- l'ajout d'armatures internes ou externes passives avec ou sans scellement,

- l'ajout d'armatures actives additionnelles, qui peut imposer des produits et systèmes performants pour résister aux sollicitations apportées par la précontrainte additionnelle (cf. **le GUIDE N° 8 [FABEM]**),

- le collage, si nécessaire, entre le mortier ou le béton ajouté et le support (béton contrecollé avec ou sans couture),

- les sollicitations développées par les retraits (thermique, endogène, au jeune âge, à long terme…), qui jouent pour les réparations importantes en surface et épaisseur,
- la réalisation de calages, ce qui implique un produit ou un système au retrait compensé,
- l'incidence du maintien ou de la restauration de la passivation des aciers, qui peut faire appel à différents produits et systèmes, voire procédés : déminéralisation, ré-alcalinisation, protection cathodique, revêtement actif ou passif des armatures, inhibiteurs de corrosion ;
- etc.

A cela, il ne faut pas oublier **l'incidence des exigences du maître d'ouvrage** (ou du gestionnaire) qui sont à prendre en compte aussi bien lors de la conception de la réparation que lors de son exécution :

- la période des travaux et les conditions climatiques qui en résultent, jouent sur le choix des produits et le déroulement des travaux (nécessité de moyens de protection, d'appareils de chauffage…) ;
- le maintien du trafic, surtout celui des poids lourds, qui peut provoquer des vibrations néfastes à l'adhérence des produits de réparation donc à la pérennité de la réparation ;
- les délais imposés à la durée des travaux. Une remise en service de l'ouvrage trop rapide risque d'être incompatible avec les délais à respecter entre les phases d'application de certains produits… ;
- l'aspect esthétique souhaité après traitement, etc.

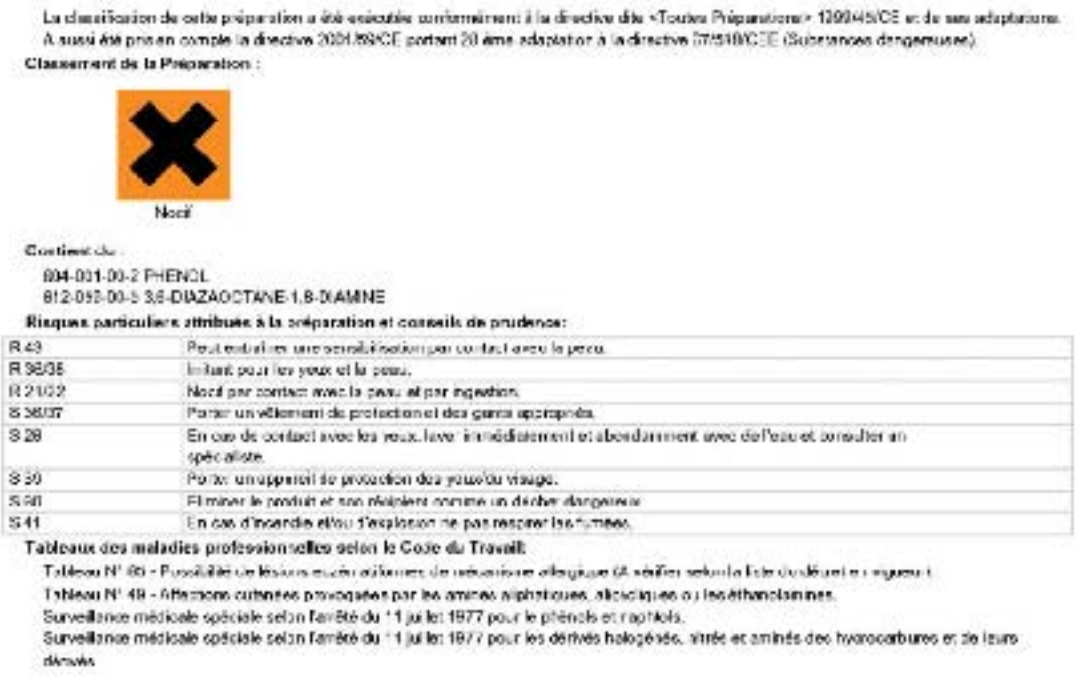
3.3.2.2 Critères de choix liés à la santé, la sécurité, la protection de l'environnement, etc.

> Les critères de choix doivent prendre en compte les dangers et les inconvénients pour la santé, la sécurité, l'agriculture, la nature et l'environnement, à cause de la nocivité et de la toxicité de certains composants :

- il faut choisir les produits en tenant compte des risques qu'ils présentent par l'intermédiaire de leur étiquetage et de leur fiche de données de sécurité **(FDS) ;**
- il faut mettre en œuvre les procédés d'application générant le moins de nuisances ;
- pour la protection des personnels, l'entrepreneur doit s'assurer du respect de la législation du travail en matière d'hygiène et de sécurité et fournir à son personnel les équipements de protection individuelle **(ÉPI)** nécessaires ;
- pour la protection des personnes et de l'environnement, **l'entrepreneur** doit tenir compte dans le choix des produits d'injection des exigences réglementaires lors de l'utilisation des produits et lors du traitement des déchets.

Remarque : *les normes de produits ne donnent, en général, aucune indication sur les précautions à prendre en matière d'hygiène et de sécurité. Il faut se reporter* ***aux fiches de données de sécurité (FDS) des produits qui fixent les règles à suivre et les équipements de protection individuelle (ÉPI) à utiliser. La réglementation impose la présence des fiches sur le chantier.***

En ce qui concerne certains procédés tels que la ré-alcalinisation, qui font appel à l'énergie électrique, il convient de rappeler que ***l'entrepreneur*** doit prendre en compte les risques qu'ils présentent pour assurer la sécurité de son personnel et des tiers.



La classification de cette préparation a été exécutée conformément à la directive dite «Toutes Préparations» 1999/45/CE et de ses adaptations.
A aussi été pris en compte la directive 2001/59/CE portant 28 ème adaptation à la directive 67/548/CEE (Substances dangereuses).

Classement de la Préparation :

Nocif

Contient de :

004-001-00-2 PHENOL
612-092-00-5 3,6-DIAZAOCTANE-1,8-DIAMINE

Risques particuliers attribués à la préparation et conseils de prudence:

R 43	Peut entraîner une sensibilisation par contact avec la peau.
R 36/38	Irritant pour les yeux et la peau.
R 21/22	Nocif par contact avec la peau et par ingestion.
S 36/37	Porter un vêtement de protection et des gants appropriés.
S 28	En cas de contact avec les yeux, laver immédiatement et abondamment avec de l'eau et consulter un spécialiste.
S 39	Porter un appareil de protection des yeux/du visage.
S 60	Eliminer le produit et son récipient comme un déchet dangereux.
S 41	En cas d'incendie et/ou d'explosion ne pas respirer les fumées.

Tableaux des maladies professionnelles selon le Code du Travail:

Tableau N° 65 - Possibilité de lésions eczématiformes de mécanisme allergique (à rédiger selon la liste limitative figurant à l'annexe I).
Tableau N° 49 - Affections cutanées provoquées par les amines aliphatiques, alicycliques et les éthanolamines.
Surveillance médicale spéciale selon l'arrêté du 11 juillet 1977 pour le phénols et naphtols.
Surveillance médicale spéciale selon l'arrêté du 11 juillet 1977 pour les dérivés halogénés, nitrés et aminés des hydrocarbures et de leurs dérivés.

Figure n° 29 : extrait d'une fiche de données de sécurité (FDS) de la société Parexlanko

3.3.3 CRITÈRES DE CHOIX SPÉCIFIQUES AUX PRODUITS ET SYSTÈMES DE RÉPARATION STRUCTURALE ET NON STRUCTURALE

Nota : *dans le présent article, la réparation structurale inclut la notion de renforcement.*

3.3.3.1 Généralités

Les fonctions auxquelles **un produit ou un système de réparation structurale** (avec ou sans renforcement) **ou non structurale** doit répondre sont fixées par **le marché** et contrôlées, si nécessaire, par **une épreuve d'étude[37].**

> Le présent article 3.3.3 porte sur les produits et systèmes suivants :

- produits et systèmes destinés aux réparations des bétons et appliqués, le plus souvent, en faibles épaisseurs (par exemple, mortier de ragréage…) ;
- produits et systèmes destinés aux réparations et aux renforcements des bétons et appliqués en fortes épaisseurs (par exemple, béton coulé en place…) ;
- produits et systèmes destinées au collage des bétons (béton frais sur béton durci, béton durci sur béton durci, voire armatures de renfort externes au béton [plats métalliques ou plaques et tissus composites]) ;
- produits et systèmes destinés à l'injection ou au remplissage des vides et fissures (traité dans le **GUIDE N°3 [FABEM]**) ;
- produits et systèmes destinés au scellement d'armatures de béton armé ;
- produits et systèmes destinés au calage d'éléments ;
- les armatures de béton armé en acier normal, en acier galvanisé, en acier inoxydable, voire en composite ;
- les armatures et procédés de précontrainte ;
- les plats métalliques, les plaques et les tissus composites pour le renfort des structures en béton (traité dans le **GUIDE N°7 [FABEM]**).

Note : *les différents constituants et produits connexes (granulats, ciments…) utilisés pour la fabrication des produits de réparations sont visés à l'article 3.3.5 ci-après.*

[37] *Les caractéristiques d'un produit normalisé même bénéficiant d'une marque de certification ou du marquage CE, ne permettent pas toujours d'assurer les fonctions recherchées pour la réparation d'une structure donnée. Des essais complémentaires sont parfois nécessaires.*

Les termes de faible épaisseur et de forte épaisseur ne sont pas définis dans les normes européennes.Ils apparaissent dans les normes françaises, où l'on parle d'application superficielle et aussi dans les documentations techniques des divers fabricants. Pour ces derniers, les limites correspondantes ne sont pas identiques. De plus, ces limites varient aussi avec le type de produit (mortier de surfaçage, de ragréage, de réparation…), avec la composition du produit (liants hydrauliques ou organiques), voire avec la technique de mise en œuvre (à la main, par projection en voie sèche ou humide…).

À titre indicatif, il a été relevé dans certaines fiches techniques que l'épaisseur maximale de certains mortiers hydrauliques peut atteindre ou dépasser 100 mm avec une mise en place manuelle en plusieurs couches alors que l'épaisseur maximale des mortiers à base de résines de synthèse ne dépasse que rarement les 40 ou 50 mm.

Dans le présent guide, il a été admis que la faible épaisseur correspond environ à la valeur de l'enrobage des armatures soit, normalement de 10 à 40 mm.

> Rappel : avant mais, le plus souvent, après une réparation structurale ou non structurale (combinée ou non avec une préservation de la passivité des armatures), il peut être nécessaire de réaliser. :

- un colmatage ou un remplissage ou un pontage des fissures existantes dans le cadre d'une protection contre la pénétration d'agents agressifs. Se reporter, **pour le choix des produits et systèmes, au GUIDE N°2 [FABEM] ;**
- **une protection supplémentaire,** soit contre la pénétration d'agents agressifs et/ou de l'humidité, soit pour améliorer la résistance physique et/ou chimique, voire pour augmenter la résistivité du béton et/ou assurer un contrôle cathodique. Cette protection peut être assurée par une imprégnation hydrophobe ou non, un revêtement… Se reporter, **pour le choix des produits et systèmes, au GUIDE N°4 [FABEM].**

Avertissement : les produits de réparation structurale et de réparation non structurale sont soumis à des essais de performance qui relèvent de la norme NF EN 1504-3 mais les composants de ces produits ne font pas l'objet de spécifications particulières. Il est donc impératif de bien fixer dans **le marché** les utilisations exigées et les conditions environnementales. En effet, par exemple, La compatibilité thermique vis-à-vis du gel/dégel ne fait pas partie de toutes les utilisations prévues.

Cet avertissement est valable pour tous les produits relevant des normes de la série NF EN 1504-* *.

3.3.3.2 Choix des produits et systèmes de réparation des bétons appliqués en faibles épaisseurs

Ces produits et systèmes sont, en général, prêts à l'emploi. Les produits utilisés **dans le domaine du bâtiment** tels que des mortiers de ragréage pour sols et murs en béton, les mortiers d'imperméabilisation… sont des produits à utiliser en faibles épaisseurs. **Dans le domaine du génie civil mais aussi du bâtiment,** les mortiers de réparation performants conformes à la norme **XP 18-840[38] encore en vigueur** sont des produits destinés aux réparations de surface (sciées ou rugueuses) et eux aussi appliqués en faible épaisseur.

Le coût, relativement élevé, des produits performants prêts à l'emploi fait qu'ils sont, le plus souvent, mis en œuvre en faibles quantités. Leurs performances les rendent bien adaptés à la réalisation des reprises locales des bétons dégradés, d'autant qu'il n'est pas possible, pour les réparations en faibles épaisseurs, de compter sur la participation **des armatures de couture existantes ou ajoutées.** La part des sollicitations qui transite par la réparation est équilibrée par l'adhérence entre le béton existant et le produit et/ou le système de réparation.

> La réparation d'un béton peut être assurée par différentes familles de produits et systèmes à base de liants organiques ou de liants hydrauliques. Ces produits et systèmes sont essentiellement destinés au traitement des défauts ou dégradations suivants :

- faïençage et fissuration superficielle,
- bullage, nids de cailloux, trous et cavités,
- défauts d'alignement des coffrages, défauts importants de planéité,
- porosité excessive entraînant une carbonatation,
- usure superficielle du béton (abrasion, érosion),
- épaufrures sans armatures apparentes,
- dégradation superficielle du béton due à l'environnement,
- trous dans le béton avec armature apparente (défaut de bétonnage),
- éclatement du béton avec armature apparente corrodée ou non.

Les origines physiques, chimiques… des désordres correspondants ont été exposées dans l'article 3.2.3 ci-devant.

Les compositions des principaux produits et systèmes utilisés font l'objet du paragraphe suivant.

[38] Nombre de ces produits sont admis à la Marque NF-Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique, marque régie par le règlement NF 030

3.3.3.2.1 Composition des produits et systèmes de réparation des bétons appliqués, le plus souvent, en faibles épaisseurs

Les produits utilisés pour la réparation des bétons dégradés peuvent être subdivisés en trois catégories selon que le liant qui assure la cohésion de l'ensemble est de **nature hydraulique** (ciment, par exemple), **organique réactif** (résine époxyde, par exemple) **ou mixte**, c'est-à-dire à la fois hydraulique et organique réactif (époxy-ciment, par exemple).

■ **Les produits et systèmes à base de liants hydrauliques** se subdivisent eux-mêmes, selon que le liant en question est seul ou modifié par ajout d'un polymère organique chimiquement non réactif.

Les systèmes à base de liants hydrauliques modifiés, appelés **LHM** dans **le guide technique de 1996** édité par le **LCPC** et le **Sétra,** sont désignés par **PCC** dans la norme européenne NF EN 1504-1 qui reste floue entre les liants organiques réactifs et les ajouts organiques chimiquement inertes.

■ **Les produits et systèmes à base de résines synthétiques,** désignés par **PC** dans la norme européenne, sont assez différents les uns des autres selon les transformations physiques et chimiques qui se produisent au cours de leur mise en œuvre et selon la structure du polymère obtenu finalement (linéaire : polymère thermoplastique ; réticulé : polymère thermodurcissable). Ce sont essentiellement les thermodurs et principalement les résines époxydes qui sont utilisés en réparation.

■ **Les produits mixtes,** dont le **liant actif est constitué à la fois de ciment et de résine synthétique réactive,** font intervenir à la fois la prise et le durcissement du liant hydraulique et la réticulation du polymère organique. Ils sont souvent confondus dans les **PCC,** bien que leurs caractéristiques soient assez différentes, au niveau de la mise en œuvre notamment.

Photo n° 83 : le guide technique sur la réparation des bétons d'août 1996 (crédit photo LCPC-SETRA)

> Tous ces produits ou systèmes peuvent être :

- prêts à l'emploi,
- fabriqués en centrale (concerne surtout les bétons ou mortiers hydrauliques),
- fabriqués sur chantier (bétons ou mortiers hydrauliques).

3.3.3.2.2 Critères de choix des produits et systèmes de réparation des bétons appliqués, le plus souvent, en faibles épaisseurs

Le présent article aborde **le choix des produits** à partir **de la fonction principale recherchée** dans les domaines du bâtiment et du génie civil. Dans la majorité des cas, le produit doit également satisfaire à **d'autres fonctions.**

Il est rappelé que deux produits dont la composition comporte le même liant peuvent avoir **des niveaux différents de performance.** Il faut donc consulter **les fiches techniques des produits,** qui doivent être renseignées sur les niveaux de performances (classes) par références aux normes en vigueur et, en particulier, la norme harmonisée **NF EN 1504-3 qui est prise ici comme référence[39].**

> Le choix des produits utilisables pour réparer les différents défauts constatés dépend essentiellement des trois critères suivants :

- **Premier critère : des caractéristiques mécaniques et physico-chimiques propres au produit** et indiquées dans le tableau ci-dessous (adhérence, effet passivant, résistance à la fissuration,…), où sont représentés les produits les plus fréquemment employés.

Sigles des normes européennes	PCC	PC		
CARACTÉRISTIQUES	LHM (1)	EP	PUR	EP-C
Adhérence sur support sec	+	+++	++ (2)	++
Adhérence sur support humide	++	+	- (3)	++
Adaptation à la fissuration du support	+	+	++ ou +++	
Effet passivant	+++	0 (4)	0 (4)	++ ou +++
Module d'élasticité	élevé	moyen	faible	moyen
Compatibilité thermique (5)	+++	+	+	++
Résistance à l'abrasion (6)	++	+++	++	++
Résistance à la pénétration des liquides sous pression	++	+++ (7)	+++ (7)	++
Fluage à 20 °C	faible	moyen	élevé	moyen
Fluage à 50 °C	faible	élevé	élevé	moyen
Retrait	moyen	faible	faible	moyen

Tableau n° 16 : extrait du guide technique SETRA-LCPC de 1996

Légende :
PCC : produit à base de liants hydrauliques modifiés par ajout de polymère organique non réactif,
EP : produit à base de résine époxyde (sigle PC dans la norme NF EN 1504-1),
PUR : produit à base de polyuréthanne (sigle PC dans la norme NF EN 1504-1),
EP-C : produit mixte à base de résine époxyde et de ciment hydraulique (sigle PC dans la norme NF EN 1504-1),

+++ : plus le nombre de + est élevé, mieux le produit est adapté à la caractéristique recherchée,
- : non recommandé,
0 : le produit ne répond pas à la question posée.

[39] *Rappel, cette norme va se substituer à la norme expérimentale XP P 18-840.*

Notes :

(1) Dans le domaine des ouvrages d'art, la plupart des produits à base de liants hydrauliques effectivement utilisés sont des PCC (sigle LHM dans le guide). Les mortiers hydrauliques classiques sont en revanche très largement employés dans le bâtiment

(2) Dans le cas où le support est très alcalin, il peut être nécessaire d'utiliser un primaire approprié et il convient de le vérifier auprès du fabricant du produit.

(3) Les polyuréthannes peuvent être utilisés sur support humide avec un primaire approprié

(4) Pour obtenir un effet passivant il faut utiliser un primaire (passivant).

(5) La compatibilité thermique est envisagée dans le cas présent pour les mortiers en épaisseur supérieure à 2 cm. C'est la capacité à suivre les déformations thermiques du béton.

(6) La comparaison de la résistance à l'abrasion est donnée en supposant que les granulats sont identiques pour toutes les familles de produits.

(7) Le pourcentage en masse de la résine est au moins de 20 %.

D'une manière générale il convient de noter que ces caractéristiques sont données à titre indicatif pour la majorité des produits appartenant à la famille considérée. Toutefois, la diversité des caractéristiques offertes par des formulations spéciales n'est pas prise en compte dans ce tableau.

Il faut noter que **les mortiers à base de liants organiques** (époxydes, polyuréthannes,…) ont **un module de déformation** nettement plus faible que celui des bétons et un module de dilatation beaucoup plus élevé que celui des bétons. De plus, totalement insolubles dans l'eau, ils ne peuvent avoir aucune action passivante vis-à-vis de l'acier, comme les mortiers hydrauliques. Ils ne protègent donc les armatures de l'action de l'eau que par leur propre épaisseur. Ils ne sont, en conséquence, utilisés que dans des cas particuliers.

Les mortiers à base de liants hydrauliques modifiés par des polymères sont utilisés dans la majorité des cas, de préférence aux mortiers traditionnels, du fait de leurs meilleures performances (thixotropie, montée en résistance, adhérence,…).

> ***Nota :*** ***pour les petites réparations et surtout dans le domaine du bâtiment,*** *sont utilisés des produits fabriqués sur le chantier à base de liants hydrauliques et de polymères (latex) comme suit :*

- mélange de ciment et d'un polymère dilué dans l'eau pour constituer une barbotine d'accrochage,

- gâchage du mortier avec un polymère dilué dans l'eau.

Seule **une épreuve d'étude ou de convenance** peut permettre de s'assurer du respect des exigences de performance visées par les normes.

■ **Deuxième critère : des aptitudes et conditions de mise en œuvre et d'utilisation** (Tableau n° 17)

Sigles des normes européennes	PCC	PC		
CRITÈRES	**PCC**	**EP**	**PUR**	**EP-C**
DPU (durée pratique d'utilisation)	A vérifier auprès des fournisseurs et s'assurer de sa compatibilité avec les exigences du chantier			
Température du support (°C) (1)	5-35	8-35	5-35	5-50
Température ambiante (°C) (1)	5-50	8-50	5-50	5-50
HR ambiante (2) (humidité relative)	jusqu'à 100 %	jusqu'à 85 %	jusqu'à 75 %	jusqu'à 100 %
Préparation du support	Indispensable en fonction du produit et des conditions imposées par le chantier			
Age du support	indifférent	> 28 jours	> 28 jours	indifférent
Aptitude à l'application : horizontale (au sol) verticale	sans problème – de préférence choisir un produit autolissant pour chaque famille utiliser des produits thixotropes			
Aptitude au nettoyage (entretien)	+	+++	+++	++
Compatibilité avec le produit déjà en place	A étudier au cas par cas			
Résistance aux agressions chimiques	+	+++	++	++
Résistance aux UV	+++	+	++/+++	++
Résistance aux cycles gel/dégel	++	+++	+++	++
Rapidité de mise en service	++	+++	++	++
Faiblesse du coût (3)	+++	+	+	++

Tableau n° 17 : extrait du guide technique SETRA-LCPC de 1996

Notes

(1) Il faut être vigilant lorsqu'on s'approche des températures extrêmes indiquées,

(2) En ambiance sèche, il faut utiliser un produit de cure,

(3) En se plaçant dans l'hypothèse d'un ragréage, avec des quantités de produits identiques et une épaisseur à respecter, les produits peuvent être classés du moins cher au plus cher : le moins cher est le PCC (LHM), puis l'EP-C et enfin l'EP et le PUR.

■ **Troisième critère : des caractéristiques mécaniques minimales** à exiger pour les utilisations prévues (par la norme) et qui sont données par les deux tableaux suivants extraits des tableaux n°1 et n°3 de la norme **NF EN 1504-3.**

ATTENTION, *ces tableaux sont applicables* ***non seulement à toutes les réparations*** *(restauration du béton au moyen d'un mortier mis en place manuellement, par coulage d'un nouveau béton, par béton projeté…),* ***mais aussi aux renforcements*** *(renforcement par ajout de mortier ou de béton) et également* ***à la préservation ou la restauration de la passivité des armatures*** *(passivité conservée ou restaurée par augmentation de l'enrobage et par remplacement du béton contaminé).*

Cependant, certaines des exigences de performance, en particulier celles concernant les produits et systèmes ***à caractère non structural,*** *ne permettent pas de satisfaire certains des principes de réparation ou de protection (les principes 3, 4 et 7) de la norme* ***XP ENV 1504-9*** *et repris par la norme* ***NF EN 1504-3****. Les notes annexées au tableau explicitent ces particularités.*

De plus, il est nécessaire, ***si la réparation présente un caractère structural et si les caractéristiques du béton de la structure*** *(résistance, module d'élasticité…..)* ***sont supérieures aux valeurs minimales,*** *d'exiger des caractéristiques pour les produits et systèmes supérieures à ces minimaux*[40]*.*

Enfin, il y lieu de rappeler *(se reporter à l'article 3.3.2.1) qu'outre* ***les caractéristiques obligatoires*** *pour toutes les utilisations (marquées par «■» dans le Tableau n° 18),* ***des caractéristiques de performance complémentaires*** *sont à exiger par* ***le marché*** *pour* ***certaines utilisations prévues*** *(marquées par «□» dans le Tableau n° 18) et aussi pour* ***les quatre applications particulières*** *listées ci-dessous.* ***Enfin, les utilisations non prévues*** *nécessitent des exigences spécifiques.*

Lorsque des exigences de tenue au feu *sont nécessaires, il appartient* ***au marché*** *de fixer la classe de performance et le niveau d'attestation de conformité.*

- **lorsque le produit ou le système de réparation se trouve soumis à une forte concentration d'ions chlorure** (par exemple, ouvrage au contact de l'eau de mer), étant donné que les exigences sur l'absorption capillaire du Tableau n° 19 ci-après sont peu élevées, il peut être nécessaire, soit de les relever, soit d'imposer la mise en œuvre d'un revêtement ad hoc. Pour les revêtements, dans le **GUIDE N°4 [FABEM],** le niveau de l'absorption capillaire descend à 0,1, voire à 0,01 kg/(m^2 x $h^{0,5}$)

- **il faut tenir compte du fluage en compression** dans le cas des réparations structurales avec des produits à bas de résines de synthèse, si les contraintes dépassent 60% de la résistance normalisée à 28 jours,

- **lorsque le produit ou le système de réparation se trouve soumis à un environnement chimiquement agressif,** il peut être nécessaire de fixer **des exigences de résistance chimique** si un revêtement de protection n'est pas appliqué (la norme **NF EN 1504-2** relative aux systèmes de protection de surface pour béton impose pour la résistance chimique une absence de défaut après 30 jours d'exposition. Elle traite aussi de la résistance aux fortes attaques chimiques). En fonction de la nature du produit chimique, de sa concentration et de la fréquence potentielle des attaques, il faut exiger un produit de réparation adapté ce qui peut imposer une épreuve d'étude spécifique ou la mise en œuvre d'un revêtement de protection,

[40] Le niveau d'adhérence maximal visé par la norme européenne ne dépasse pas 2 MPa alors que la norme française ***P 18-840*** *(base de la* ***Marque NF-Produits spéciaux****) va jusqu'à 3 MPa. De même, le niveau fixé pour le module d'élasticité de 20 GPa est faible. Des produits nettement plus performants que ces minimaux sont produits par les fabricants.*

- **l'application au plafond** impose le respect d'une contrainte d'adhérence du tableau 3 de la norme (le Tableau n° 19 du guide) mais aussi un produit thixotrope[41].

ATTENTION, d'autres exigences non définies dans la norme européenne sont parfois nécessaires, à savoir :

- une résistance à l'abrasion ;
- une résistance élevée au jeune âge (quelques heures ou quelques jours) ;
- un mode de mise en œuvre (manuel, par injection, coulage, projection) ;
- etc.

> Essais de résistance à l'abrasion et l'érosion :

La norme NF EN 1504-2 vise l'essai TABER (NF EN ISO 5470-1 et aussi les méthodes d'essai de la norme **NF EN 13813**). Ces essais simulent l'effet d'un trafic. Ils ne sont pas utilisables pour simuler l'effet de l'érosion par des eaux chargées. Pour ce type d'érosion, il est possible d'avoir recours à deux essais de la **CNR** (Compagnie Nationale du Rhône)[42]:

- l'essai d'érosion représentatif des eaux chargées en alluvions (l'éprouvette du produit à tester encadrée par deux plaques de verre [ces plaques servent de référence] est soumise à un jet d'eau chargée en sable). C'est la comparaison des empreintes créées dans l'éprouvette et dans le verre qui permet de qualifier le produit ;
- l'essai de choc représentatif des eaux charriant des blocs (l'éprouvette du produit à tester fixée dans un tambour tournant est soumise à chaque tour du tambour à un choc par la chute d'une boule métallique). Ici encore, c'est l'importance de l'empreinte créée qui permet de qualifier le produit.

[41] L'orientation du support joue sur les épaisseurs pouvant être mises en œuvre (consulter les notices des fabricants).

[42] Le laboratoire de la CNR se trouve à Lyon.

Caractéristiques de performance	Principe de réparation			
	3 Restauration du béton		4 Renforcement structural	7 Préservation ou restauration de la passivité
	Méthodes de réparation			
	3.1 Mortier mis en place manuellement 3.2 Coulage nouveau béton	3.3 Mortier ou béton projeté (a)	4.4 Ajout de mortier ou béton	7.1 Augmentation de l'enrobage par mortier ou béton 7.2 remplacement du béton contaminé ou carbonaté
Résistance en compression	■	■	■	■
Teneur en ions chlorure (b)	■	■	■	■
Adhérence	■	■	■	■
Retrait /expansion empêchés (c)	■	■ (voir la remarque *)	■	■
Durabilité : a) Résistance à la carbonatation (b) (d)	■	■	■	■
Module d'élasticité (concerne le renforcement structural)	□	□	■	□
Durabilité : b) Compatibilité thermique, partie 1 ou 2 ou 4 de l'EN 13687(e)	□	□	□	□
Résistance au glissement et au dérapage (f)	□	□	□	□
Coefficient de dilatation (g)	□	□	□	□
Absorption capillaire (perméabilité à l'eau) (e) (h)	□	□	□	□

Tableau n° 18 : extrait de la norme EN 1504-3

Notes :

a) le mode d'application du mortier ou du béton peut imposer la modification de certaines des méthodes d'essais (cf. NF EN 14487-1) ;

b) la réparation du béton non armé n'est pas concernée par cette exigence de teneur en ions chlorure du produit ou système de réparation ;

c) cet essai n'est pas requis si les essais de cycles thermiques sont effectués ;

d) cet essai n'est pas requis lorsque le système de réparation comporte un revêtement assurant une protection contre la carbonatation (cf. NF EN 1504-2) ou s'il s'agit d'un mortier de type PC (pH neutre) ;

e) les essais à effectuer dépendent des conditions d'exposition de la réparation ;

f) ces essais concernent les zones soumises à des circulations ;

g) ces essais concernent les produits de type PC ;

h) cet essai, comme celui relatif à la teneur en ions chlorure dans les produits et celui relatif à la carbonatation, concerne la résistance à la corrosion des armatures. En effet, une faible perméabilité à l'eau empêche la pénétration des chlorures. Ces trois exigences ont pour but de préserver la passivité des armatures, passivité qui est visée dans l'article 3.3.4 ci-après.

(*) Remarque : *le tableau ci-dessus exige pour les mortiers et les bétons projetés* ***des essais de mesure du retrait et de l'expansion empêchés,*** *or, la note b) du tableau suivant indique que* ***cette méthode d'essai n'est pas requise pour la méthode de réparation 3.3.*** *Il y a donc un certain flou sur ce point dans la norme qui précise cependant (note a) de se rapprocher de la norme* ***NF EN 14487-1,*** *car certaines méthodes d'essai peuvent se trouver modifiées par le mode d'application du mortier ou du béton.*

Point n°	Caractéristiques de performance	Support de référence (EN 1766)	Méthode d'essai	Exigences			
				Structurale		Non structurale	
				Classe R 4	Classe R3	Classe R2	Classe R1
1	**Résistance en compression**	Se reporter au tableau 3 de la norme NF EN 1504-3	NF EN 12190	≥ 45 MPa	≥ 25 MPa	≥ 15 MPa	≥ 10 MPa
2	**Teneur en ions chlorure**		NF EN 1015-17	≤ 0,05%		≤ 0,05%	
3	**Adhérence**		NF EN 1542	≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa (a)	
4	**Retrait /expansion empêchés (b) (c)**		NF EN 12617-4	**Contrainte d'adhérence après essais (d) (e)** ≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa (a)	Aucune exigence
5	**Résistance à la carbonatation (f)**		NF EN 13295	d_K ≤ béton témoin (MC [0,45])		Aucune exigence (g)	
6	**Module d'élasticité**		NF EN 13412	≥ 20 GPa (*)	≥ 15 GPa (*)	Aucune exigence	
7	**Compatibilité thermique (f) (h) Partie 1 : gel-dégel**		NF EN 13687-1	**Contrainte d'adhérence au bout de 50 cycles (d) (e)** ≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa (a)	Examen visuel au bout de 50 cycles
8	**Compatibilité thermique (f) (h) Partie 2 : pluie d'orage**		NF EN 13687-2	**Contrainte d'adhérence au bout de 30 cycles (d) (e)** ≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa (a)	Examen visuel au bout de 30 cycles
9	**Compatibilité thermique (f) (h) Partie 4 : cycles thermiques à sec**		NF EN 13687-4	**Contrainte d'adhérence au bout de 30 cycles (d) (e)** ≥ 2 MPa	≥ 1,5 MPa	≥ 0,8 MPa (a)	Examen visuel au bout de 30 cycles
10	**Résistance au glissement et au dérapage**		NF EN 13036-4	Classe I : > 40 unités essayées humides		Classe I : > 40 unités essayées humides	
				Classe II : > 40 unités essayées à sec		Classe II : > 40 unités essayées à sec	
				Classe I : > 55 unités essayées humides		Classe I : > 55 unités essayées humides	
11	**Coefficient de dilatation (c)**		NF EN 1770	Non requis si les essais 7, 8 et 9 sont effectués. Sinon valeur déclarée		Non requis si les essais 7, 8 et 9 sont effectués. Sinon valeur déclarée	
12	**Absorption capillaire**		NF EN 13057	w ≤ 0,5 kg/(m² x $h^{0,5}$)		Aucune exigence	

Tableau n° 19 : performances exigées des différents produits (extrait de la norme EN 1504-3)

Notes :

a) la valeur de 0,8 MPa n'est pas requise s'il y a rupture de cohésion du matériau de réparation, une résistance minimale en traction de 0,5 MPa est cependant exigée ;

*b) essai non requis pour **la méthode de réparation 3.3** par mortier ou béton projeté (se reporter à la remarque ci-devant) ;*

c) cet essai n'est pas requis si les essais de cycles thermiques sont effectués ;

d) la valeur moyenne issue des essais ≥ valeur minimale exigée, sous réserve que la valeur minimale mesurée > 75% de la valeur minimale exigée ;

e) l'ouverture moyenne des fissures qui apparaissent ≤ 0,05 mm, sous réserve qu'il n'y ait pas de fissure ≥ 0,1 mm et de feuilletage ;

f) ces essais concernent la durabilité de la réparation ;

*g) de tels produits et systèmes n'assurent pas une protection contre la carbonatation, sauf si un revêtement de protection assurant cette protection et conforme à la norme **NF EN 15404-2**, est mis en œuvre ;*

*h) le choix de la méthode d'essai dépend des conditions d'exposition de la réparation. Il est admis **qu'un produit ou système satisfaisant à la partie 1** est réputé conformes aux deux autres parties ;*

Remarque (*) :

1 GPa = 10^9 Pa = 10^4 bars ~ 10^4 kgf/cm². Un module de 20 GPa correspond donc à 200 000 bars, valeur nettement inférieure à celui des bétons de génie civil !

À titre comparatif, le tableau suivant donne les exigences de la norme française **XP P 18-840** encore en vigueur à la date de rédaction du présent document et qui est donc encore applicable, d'autant qu'elle est liée à la **Marque NF-Produits spéciaux.**

Point n°	Caractéristiques obligatoires ou complémentaires	Caractéristiques de performances	Méthode d'essai	Exigences		
				Classe 3	Classe 2	Classe 1
				Réparation structurale	Réparation structurale	Réparation non structurale
1	■	Adhérence par traction directe sans cycle thermique (1)	XP P 18-858 ou XP P 18-859	> 3,0 MPa	> 2,0 MPa	> 1,5 MPa
1 bis	■	Adhérence par traction directe avec cycle thermique (1)				
2	■	Tenue aux chocs répétés sans cycle de gel-dégel	XP P 18-854 ou XP P 18-860	Absence de fissure apparente, et décollement hors zone d'impact		
2 bis	□	Tenue aux chocs répétés avec cycle de gel-dégel	XP P 18-857 ou XP P 18-861	Absence de fissure apparente, et décollement hors zone d'impact		
3	□	Perméabilité aux liquides	XP P 18-855 ou XP P 18-862	Volume «V» ayant traversé l'éprouvette ≤ celui ayant traversé l'éprouvette témoin		
4	□	Tenue aux rayonnements UV (produits à base de résines laissés apparents)	XP P 18-856	Absence de craquelure, cloque, farinage et micro-fissure. Un changement de teinte est à signaler		

Tableau n° 20 : extrait de la norme P 18-840

Note (1) :

Ces exigences concernent les produits à base de résine synthétiques, comme ceux à base de liants hydrauliques et concernent un support sec comme humide, un support vertical comme horizontal et une surface sciée comme adhérente.

Les exigences de la norme européenne sont plus complètes que celles de la norme française mais elle impose **pour l'adhérence** un niveau de performance nettement plus faible ! Un niveau d'adhérence plus élevé peut-être demandé pour les produits à base de résines synthétiques si le béton support présente des caractéristiques mécaniques suffisantes.

3.3.3.3 Choix des produits et systèmes de réparation ou de renforcement des bétons appliqués en fortes épaisseurs

La réparation d'un béton peut conduire à la mise en œuvre de fortes épaisseurs de produits ou de systèmes. **Différentes familles de produits et systèmes à base de liants organiques ou de liants hydrauliques peuvent être envisagées.**

On considère essentiellement les produits et systèmes destinés, soit au traitement des défauts ou dégradations qui ont un caractère structural de par leur importance en surface et profondeur, soit aux renforcements des structures.

Les origines physiques, chimiques… des éventuels désordres ont été exposées dans l'article 3.2.3 ci-devant.

Il est rappelé que **ces produits et systèmes, une fois durcis, doivent participer à la reprise des sollicitations** (charges d'exploitation seules ou charges permanentes et d'exploitation), ce qui peut exiger des opérations connexes (mise sur cintre, vérinage…).

Il est possible, dans ce cas, **de compter sur la participation des armatures de couture existantes ou ajoutées pour équilibrer la part des sollicitations** qui transite par la réparation. Il est également important d'avoir une excellente adhérence entre le béton existant et le produit et système de réparation pour éviter des décollements, des feuilletages, des fissurations préjudiciables à la durabilité de la réparation et à la préservation de la passivité des armatures. Une amélioration de l'adhérence peut être obtenue par encollage ou par injection de résines de l'interface entre le béton existant et le produit et système de réparation.

3.3.3.3.1 Composition des produits et systèmes de réparation ou de renforcement des bétons appliqués en fortes épaisseurs

Les produits utilisés pour la réparation des bétons dégradés ou le renforcement des structures sont, comme les produits et systèmes appliqués en faible épaisseur, subdivisés en trois catégories : ceux **à base de liants hydrauliques, ceux à base de liants organiques réactifs ainsi que les mélanges de liants hydrauliques et organiques.**

> Tous ces produits ou systèmes peuvent être :

- **prêts à l'emploi,**
- **fabriqués en centrale (concerne surtout les bétons ou mortiers hydrauliques),**
- **fabriqués sur chantier (concerne bétons ou mortiers hydrauliques).**

3.3.3.3.2 Critères de choix des produits et systèmes de réparation ou de renforcement des bétons appliqués en fortes épaisseurs

Lorsque les réparations ou les renforcements mettent en œuvre de **faibles quantités de produits** (par exemple, pour le rebouchage d'un nid de cailloux, lorsqu'une rapide remise en service est imposée…), il est possible d'avoir recours **à des produits et systèmes prêts à l'emploi utilisables en faible épaisseur, sous réserve des limites d'emploi de la notice du fabricant.**

Dans le cas contraire, la recherche d'une optimisation du critère coût performance conduit à privilégier **les produits fabriqués en centrale ou sur le chantier,** tels que des mortiers, des micro-bétons et des bétons mis en place par coulage ou projection, parfois par injection. Un tel choix doit être effectué lors de la mise au point du projet de réparation.

3.3.3.3.2.1 Produits prêts à l'emploi :

Les produits et systèmes doivent respecter au minimum les **exigences structurales** de la norme **NF EN 1504-3** (se reporter au paragraphe 3.3.3.2 ci-devant).

Dans le cas pris en considération dans le présent paragraphe, la réparation présente obligatoirement un caractère structural. Il est donc nécessaire, **si les caractéristiques du béton de la structure** (résistance, module d'élasticité.....) **sont supérieures aux valeurs minimales des classes R3 et R4** du Tableau n° 19 ci-devant, d'exiger des caractéristiques supérieures à ces minimaux.

Il faut rechercher les produits ad hoc dans les fiches techniques des fabricants, voire faire mettre au point un produit adapté. De plus, **si des redistributions d'efforts par déformations différées gênées** (effets dus au fluage) **sont à craindre** (par exemple, le changement de l'état statique d'une structure en béton précontraint au cours des travaux, la réalisation de dénivellations d'appui...), **une épreuve d'étude spécifique** est à prévoir. En effet, les essais de la norme ne portent pas sur les déformations différées par fluage.

Les exigences sur l'absorption capillaire (facteur de résistance à la pénétration des ions chlorure) sont, si nécessaire (par exemple, ouvrage au contact de l'eau de mer), à relever et un revêtement de protection ad hoc peut aussi être imposé.

En cas d'exposition de la réparation ou du renforcement à un environnement chimiquement agressif, des exigences particulières sont à formuler. Si ce n'est pas possible, un revêtement de protection est à imposer.

Les autres exigences sont à préciser en tant que de besoin (résistance à l'abrasion, résistance au jeune âge...).

> Essais de résistance à l'abrasion et l'érosion :

La norme NF EN 1504-2 vise l'essai TABER **(NF EN ISO 5470-1)** et aussi les méthodes d'essai de la norme NF EN 13813. Ces essais simulent l'effet d'un trafic. Ils ne sont pas utilisables pour simuler l'effet de l'érosion par des eaux chargées. Pour ce type d'érosion, il est possible d'utiliser les deux essais de la **CNR** (Compagnie Nationale du Rhône) décrits à l'article 3.3.3.2.2 ci-devant.

3.3.3.3.2.2 Mortiers, micro-bétons et bétons prêts à l'emploi (le malaxage ayant lieu sur le chantier), fabriqués en usine ou sur le chantier :

Il est possible de réaliser **des réparations structurales et des renforcements** avec des formules de mortiers et bétons mis en place par coulage, projection, voire injection. Il convient, en plus, de s'assurer lors de **l'épreuve d'étude** qu'ils satisfont, si besoin est, aussi aux exigences de la norme **NF EN 1504-3.**

Par exemple, dans le cas où **les exigences relatives à l'adhérence** ne pourraient être satisfaites, il est envisageable de prévoir la mise en œuvre d'une barbotine d'accrochage, voire l'encollage de la surface de reprise...

■ Cas des bétons coulés en place :

Les bétons correspondants prêts à l'emploi ou réalisés sur le chantier sont régis par la norme **NF EN 206-1 et son annexe nationale.** Il s'agit d'une norme homologuée mais non harmonisée qui traite des bétons, voire, par extension, des mortiers (granulats < 4 mm). **Elle vise aussi bien les bétons de génie civil que ceux de bâtiment.**

> La simple référence à cette norme dans le marché ne suffit pas pour obtenir un béton capable de satisfaire aux objectifs d'une réparation efficace et durable et ce pour les principales raisons suivantes :

- la norme vise **trois types de bétons entre lesquels** il faut donc choisir :
    - les bétons à propriétés spécifiées **(BPS),** pour lesquels la formulation est assurée par le producteur ;
    - les bétons à composition prescrite **(BCP),** c'est le cas courant **des bétons de génie civil** visés par **le fascicule 65 A ;**
    - les bétons à composition prescrite dans une norme, qui concernent les ouvrages de bâtiment de faible importance R +2 (cf. le **DTU 21**) ;
- **l'agressivité de l'environnement** (les classes d'exposition) auquel va être soumis le béton doit être définie. Aux différentes classes d'exposition correspondent une classe de résistance minimale, une teneur minimale en liant équivalent, le type de ciment à utiliser, une teneur minimale en air occlus (bétons soumis au gel)... Mais, ces minimaux **(annexes F informative et NA.F normative)** correspondent **à une durée de vie des structures d'environ 50 ans ;**
- les environnements les plus sévères (A 4) du fascicule de documentation **FD P 18-011** ne sont pas visés par la norme ;
- en cas de gel sévère avec ou sans salage, la teneur en air occlus ne suffit pas toujours à rendre le béton totalement résistant au gel (cf. **les recommandations de décembre 2003** du **LCPC** sur la durabilité des bétons durcis soumis au gel, qui sont visées par l'annexe «NA. F.» à caractère normatif de la norme). De plus l'intensité et la durée des salages n'apparaît pas dans les classes d'exposition XF (se reporter au **fascicule 65 A du CCTG**) ;
- si les **recommandations de 1994** sur la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction sont visées par la norme, **le guide de 1996 du Sétra** sur la rédaction des pièces écrites n'est pas cité ;
- il n'y a pas d'indications sur la prévention des désordres dus aux réactions sulfatiques internes ;
- il n'y a pas d'indications sur les résistances au jeune âge, la résistance à l'abrasion ;
- la norme autorise les approches performantielles mais sans fixer d'exigences ;
- des exigences particulières sont nécessaires dans le domaine du génie civil et celui du bâtiment. Se reporter au **fascicule 65A du CCTG et au DTU 21** ;
- certains bétons sortent du domaine d'application de la norme...

EN CONCLUSION :

☐ le chapitre 7 sur les bétons et mortiers du **fascicule 65 A du CCTG** rappelle les différents textes auxquels auxquels il faut faire référence et permet plus facilement de décrypter l'utilisation de la norme **NF EN 206-1**[43]. Ce texte précise comment appliquer la norme européenne aux bétons d'ouvrages d'art.

☐ **le DTU 21** complète les exigences de la norme dans le domaine du bâtiment.

☐ **le guide de juillet 2004 de l'AFGC** sur la conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages et **son approche performantielle** peut être utilisé pour fixer les caractéristiques que doivent présenter un béton de réparation (se reporter au tableau 13 qui fixe les valeurs limites de porosité, de perméabilité…). De plus, l'article A15.4 donne une démarche de contrôle sur chantier.

Il est à noter que la norme **NF EN 206-1** permet aussi une approche performantielle.

■ **Cas des bétons autoplaçants (BAP) :**

En sus des dispositions applicables aux bétons courants, il faut se reporter aux nouvelles règles parues dans **les recommandations de janvier 2008 de l'AFGC.**

Photo n° 84 : recommandations de L'AFGC sur les BAP de janvier 2008

[43] ***Le guide T.48 de CIMBéton de novembre 2004*** *sur la durabilité des bétons permet de mieux comprendre également l'ensemble des facteurs de durabilité et les textes qui les régissent.*

Cas des bétons à haute-performances (BHP) :

La norme **NF EN 206-1** vise les bétons jusqu'à des résistances de 100 MPa à 28 jours et sur cylindres. Il faut aussi se reporter au chapitre 2 de l'additif au **fascicule 65A du CCTG.**

Cas des bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) :

De tels bétons ont été utilisés pour renforcer des structures en béton précontraint (par exemple, un pont à poutres sous chaussée préfabriquées précontraintes de type VIPP sur la Sarthe au Mans). Se reporter **aux recommandations de janvier 2002** éditées par **l'AFGC.**

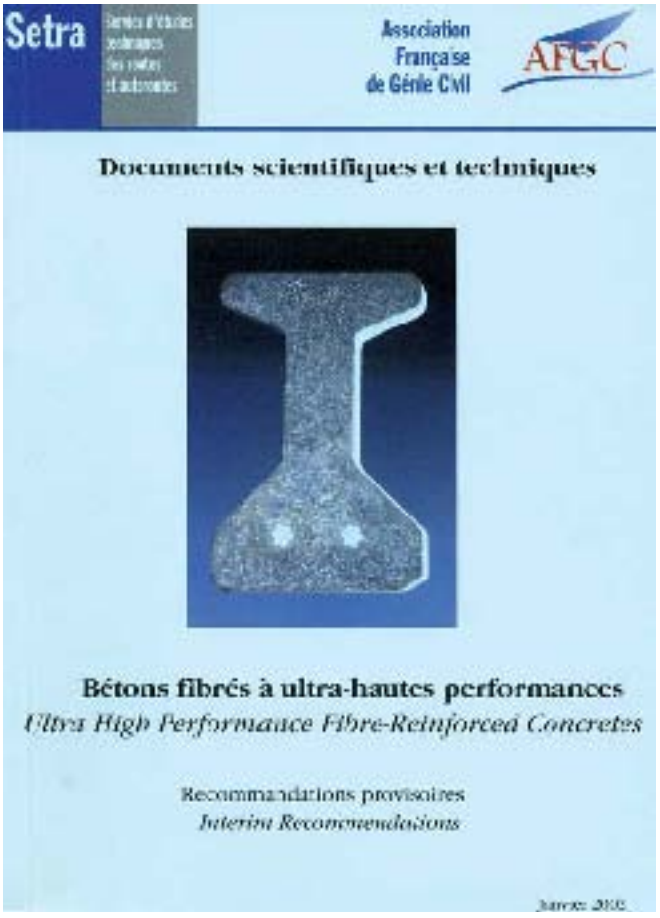


Photo n° 85 : guide de l'AFGC sur les BFUP de janvier 2002(crédit photo AFGC)

Cas des bétons mis en place par projection :

Se reporter au **GUIDE N°5 [FABEM].**

3.3.3.4 Choix des produits et systèmes de collage structural des bétons

Photo n° 86 : encollage avant pose de tissus en composites (crédit photo Freyssinet)

> Les produits et systèmes de collage structural concernent :

- le collage de béton durci sur béton durci ;
- le collage de béton frais sur béton durci ;
- le collage de plaques (en acier, en composites ou pultrudés) à la surface d'un béton.

Note : *la norme européenne semble avoir oublié le collage de tissus composites.*

> Les produits et systèmes de collage structural peuvent être mis en œuvre :

- manuellement :
- mécaniquement :
  - par projection,
  - par injection…

> La mise en œuvre d'un produit ou d'un système de collage n'est pas forcément nécessaire lors des travaux de réparation ou de renforcement d'une structure en béton. En effet :

- les produits et systèmes de réparation visés par la norme **NF EN 1504-3** peuvent présenter des niveaux d'adhérence suffisants à l'interface structure réparation ;
- les produits et systèmes de collage peuvent être nuisibles à l'adhérence, par exemple dans le cas des bétons mis en place par projection ;
- le coulage d'un béton frais au niveau d'un béton durci en réparation ne nécessite pas nécessairement un encollage de la reprise la surface de reprise si celle-ci est traversée par des armatures de couture en quantité suffisante ou précontrainte par des armatures actives additionnelles, sous réserve que la surface de reprise soit traitée suivant les règles de l'art[44];

La réalisation d'un collage structural s'avère nécessaire, par exemple, juste avant le coulage du béton lors du renforcement d'une dalle par un béton contrecollé ou lorsqu'une fissure de retrait peut se produire le long d'une reprise de bétonnage et doit être traitée par une injection. Dans de tels cas, le produit ou le système utilisé doit satisfaire aux exigences **du marché,** qui vise les exigences applicables de la norme **NF EN 1504-4** en fonction **des utilisations prévues** par celle-ci.

Suivant le type de collage (renforcement par plaque collée ou mortier ou béton collé), **la position de la réparation** (sur une surface horizontale ou verticale, au plafond), **les conditions thermiques, l'humidité du support, la tenue au feu…,** le produit ou le système devra satisfaire **à des exigences de performances communes** pour **toutes les utilisations prévues** (marquées par «■») et, en plus, à des exigences de performances particulières pour certaines utilisations prévues dans la norme (marquées par □»). Ces exigences figurent dans le tableau ci-dessous extrait de la norme.

[44] Se reporter au document édité par le CEBTP, la FFB et le Sétra intitulé : recommandations pour l'exécution des reprises.de bétonnage (2000).

Caractéristiques de performances	Principe de réparation à satisfaire 4 (renforcement structural)	
	Renforcement par plaques collées (méthode de réparation 4.3) (1)	Mortier ou béton collé (méthode de réparation 4.4) (2)
1. Aptitude à l'application :		
a) sur des surfaces verticales ou des sous-faces	□	□
b) par-dessus des surfaces horizontales (autolissant)	□	□
c) par injection	□	□
2. Aptitude à l'application et au durcissement dans les conditions ambiantes particulières suivantes :		
a) températures basses ou élevées (3)	□	□
b) substrat humide	□	■
3. Adhérence :		
a) plaque sur plaque	■	Sans objet
b) plaque sur béton	■	Sans objet
c) acier protégé contre la corrosion sur acier protégé contre la corrosion (4)	□	Sans objet
d) acier protégé contre la corrosion sur béton(4)	□	Sans objet
e) béton durci sur béton durci		■
) béton frais sur béton durci (5)		■
4. durabilité d'un système composite :		
a) cycles thermiques	■	■
b) cycles d'humidité	■	■
5. Caractéristiques des matériaux pour le concepteur :		
a) temps ouvert (5) et (6)	■	■
b) Durée pratique d'utilisation normale (6)	■	■
c) module d'élasticité en compression	■	■
d) module d'élasticité en flexion	□	□
e) résistance à la compression	■	■
f) résistance au cisaillement	■	■
g) température de transition vitreuse (*)	■	■
h) coefficient de dilatation thermique	■	■
i) retrait	■	■

Tableau n° 21 : extrait de la norme EN 1504-4

Notes :

(1). *méthode de réparation conforme à la norme XP ENV 1504-9. Il est vraisemblable que l'utilisation de plaques en acier inoxydable ne permet pas d'obtenir une liaison acceptable ;*

(2). *méthode de réparation conforme à la norme XP ENV 1504-9. Collage de béton durci sur béton durci associé à l'utilisation d'éléments préfabriqués ou collage de béton frais sur béton durci faisant partie intégrante de la structure, les trois éléments constituant une nouvelle structure. ;*

(3). *le fabricant peut spécifier des températures pour l'utilisation prévue ;*

(4). *dans ce contexte, la protection contre la corrosion implique l'application sur l'acier d'une couche de revêtement primaire anticorrosion;*

(5). *non applicable aux techniques par injection ;*

(6). *au minimum températures d'application normale et maximale ;*

(*) : Cette température doit être nettement supérieure à la température ambiante maximale de la structure en service. La mise en œuvre d'une protection thermique peut être nécessaire.

Il appartient au marché de fixer **les exigences de performances et les niveaux des attestations de conformité** nécessaires en fonction de l'usage prévu et de la mise en œuvre.

Pour ce faire, il est indispensable de s'appuyer sur le tableau précédent ainsi que sur les tableaux 3.1 (exigences de performances pour un renforcement par plaque collée) et **3.2** (exigences de performances pour le produit de collage du mortier ou béton collé) **de la norme.**

> Si l'utilisation n'est pas prévue par ces tableaux ou si certains niveaux de performance de la norme ne conviennent pas, il appartient au marché de fixer les essais spécifiques à effectuer lors de l'épreuve d'étude. C'est le cas, par exemple, des deux applications particulières visées par l'annexe informative A :

- fatigue sous chargement dynamique pendant le durcissement (cf. la norme **NF EN 13894-1);**
- fatigue sous chargement dynamique après le durcissement (cf. la norme NF EN 13894-2).

Note : *ces deux points concernent tout particulièrement le renforcement par plaques collées.*

À titre comparatif, le tableau suivant donne les exigences de la norme française **XP P 18-870** relatives aux produits et systèmes de collage encore en vigueur à la date de rédaction du présent document. Elle reste encore applicable d'autant qu'elle est liée **à la Marque NF-Produits spéciaux.**

Point n°	Caractéristiques de performances	Méthode d'essai	Utilisations prévues		Exigences
			Produits à base de liants hydrauliques	Produits à base de résines synthétiques	
1	Résistance à la traction directe (1)	XP P 18-871	■	■	Classe 1 ≥ 2 MPa Classe 2 ≥ 3,5 MPa
2	Résistance à la compression-cisaillement (1)	XP P 18-872	■	■	Classe 1 ≥ 250 KN Classe 2 ≥ 450 KN
3	Tenue sur surface verticale	XP P 18-873	■	■	Perte par coulures ≤ 10% du poids de produit mis en place
	Temps limite d'assemblage	NF P 18-874	■	Sans objet	Mention obligatoire

Tableau n° 22 : d'après la norme P 18-870 relative aux produits de collage

Note :

(1). Concerne un essai de traction directe sur cylindre de béton scié reconstitué ainsi que les supports verticaux et horizontaux, secs ou humides. De plus le type de rupture doit être renseigné.

3.3.3.5 Choix des produits et systèmes d'injection de l'interface entre le produit de réparation et le béton support

Se reporter à l'article 3.3.3.6 au-dessous

3.3.3.6 Choix des produits et systèmes d'injection ou de remplissage des fissures ou des vides du béton

Se reporter à la norme **NF EN 1504-5** et au **GUIDE N°3 [FABEM].**

3.3.3.7 Choix des produits et systèmes de scellement d'armatures de béton armé

La réalisation du scellement d'armatures en acier est développée dans le **GUIDE N°7 [FABEM].** Seul le choix des produits et systèmes de scellement est traité par le présent guide.

Le produit ou le système utilisé pour le scellement doit satisfaire aux exigences du marché, qui vise celles de la norme harmonisée **NF EN 1504-6** à appliquer en fonction des **utilisations prévues et de la nature du produit** (produit à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques).

Le tableau ci-après donne les exigences de la norme européenne :

Point n°	Caractéristiques de performances	Méthode d'essai	Utilisations prévues		Exigences
			Produits à base de liants hydrauliques	Produits à base de résines synthétiques	
1	Arrachement	NF EN 1881 (2)	■	■	Déplacement ≤ 0,6 mm sous une charge de 75 KN
2	Teneur en ions chlorure	NF EN 1015-17	■	■	≤ 0,05%
3	Température de transition vitreuse (1)	NF EN 12614	Sans objet	■	45°C ou 20°C au-dessus de la température ambiante maximale de la structure en service (la plus élevée)
4	Fluage en traction	NF EN 1544	Sans objet	■	Déplacement ≤ 0,6 mm au bout de 3 mois après application continue d'une charge de 50 KN

Tableau n° 23 : synthèse des tableaux 1 et 3 de la norme EN 1504-6

Note :

(1).Concerne la perte d'efficacité des résines synthétiques à partir d'une certaine température (entre 50 et 80°C). Il faut s'assurer que le collage ne risque pas d'être soumis pendant la durée de vie de la structure à une température supérieure. Si tel est le cas, une protection doit être mise en place ;

(2).La norme ne donne pas l'âge que doit avoir le produit de scellement lors de l'essai d'arrachement. Ce point est à préciser au marché..

À titre comparatif, les deux tableaux suivants donnent les exigences des normes françaises XP P 18-821 et XP P 18-822 relatives aux produits de scellement respectivement à base de liants hydrauliques et de liants synthétiques et encore en vigueur à la date de rédaction du présent document. Elles restent encore applicables d'autant qu'elles sont liées à la Marque NF-Produits spéciaux. Il faut, pour le moment, attendre que le marquage CE se mette en place.

Remarque : *les deux normes françaises traitent à la fois des produits de* ***calage et de scellement.***

Point n°	Caractéristiques de performance des produits de scellement à base de liants hydrauliques	Méthode d'essai	Utilisations prévues	Exigences
1	**Arrachement en position verticale ou toutes positions (1)**	XP P 18-831	■	Déplacement ≤ 0,5 mm sous une charge de 45 KN (limite d'élasticité garantie de l'acier)
2	**Tenue à l'eau de mer**	XP P 18-837	■	Allongement des éprouvettes conservées 6 mois : dans l'eau douce ≤ 400 µ/m dans l'eau de mer ≤ 600 µ/m
3	**Tenue à l'eau à haute teneur en sulfates**	XP P 18-837	■	Allongement des éprouvettes conservées 6 mois : dans l'eau douce ≤ 400 µ/m dans l'eau sulfatée ≤ 600 µ/m

Tableau n° 24 : d'après la norme P 18-821

Note :

(1) Cas de rupture 1, 2, 3 ou 5. Si la rupture est de type 4 (dans le béton), l'essai doit être refait.

Point n°	Caractéristiques de performance des produits de scellement à base de liants synthétiques	Méthode d'essai	Utilisations prévues	Exigences
1	**Arrachement en position verticale ou toutes positions (1)**	XP P 18-831	■	Déplacement ≤ 0,5 mm sous une charge de 45 KN (limite d'élasticité garantie de l'acier)
2	**Fluage en traction** **À 23°C et 50°C**	XP P 18-836	■	Après 6 mois le déplacement ≤ 0,6 mm Force d'extraction : ☐ > 85 KN si ruptures des types 1, 4 ou 5 ☐ >100 KN si ruptures des types 2 ou 3

Tableau n° 25 : d'après la norme P 18-822

Note :

(1) Cas de rupture 1, 2, 3 ou 5. Si la rupture est de type 4 (dans le béton), l'essai doit être refait.

3.3.3.8 Choix des produits et systèmes de calage d'éléments

***ATTENTION,* il n'existe pas de norme européenne** *traitant des produits et systèmes de calage.*

Le produit ou le système utilisé pour le calage doit satisfaire aux exigences **du marché**, qui vise les exigences applicables des normes françaises expérimentales **XP P 18-821 et XP P 18-822** en fonction **des utilisations prévues** par celle-ci et, aussi, en fonction de **sa nature** (produit à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques).

Photo n° 87 : réalisation d'un calage pour une reprise en sous-œuvre

Les deux tableaux suivants donnent les exigences des normes françaises **XP P 18-821 et XP P 18-822** relatives aux produits **de calage** respectivement à base de liants hydrauliques et de liants synthétiques et encore en vigueur à la date de rédaction du présent document. Elles restent applicables, d'autant qu'elles sont liées à **la Marque NF-Produits spéciaux.**

> Cas des produits à base de liants hydrauliques

Point n°	Caractéristiques de performance des produits de calage à base de liants hydrauliques	Méthode d'essai	Utilisations prévues	Exigences
1	Aptitude à la mise en place : température maximale et délai d'utilisation	XP P 18-832	■	Surface de bulles d'air ≤ 5% de la surface totale ; Surface de bulles d'eau ≤ 2% de la surface totale ;
2	Aptitude à la mise en place : température maximale de 35°C et délai d'utilisation	XP P 18-832	■	Surface de bulles d'air ≤ 5% de la surface totale ; Surface de bulles d'eau ≤ 2% de la surface totale ;
3	Ressuage en milieu confiné	XP P 18-834	■	Surface de bulles d'air ≤ 5% de la surface totale ;
4	Ressuage en milieu confiné à 5°C	XP P 18-834	■	Surface de bulles d'air ≤ 5% de la surface totale ;

Tableau n° 26 : d'après la norme P 18-821

> Cas des produits à base de résines synthétiques

Point n°	Caractéristiques de performance des produits de scellement à base de résines synthétiques	Méthode d'essai	Utilisations prévues	Exigences
1	Aptitude à la mise en place : température maximale et délai d'utilisation	XP P 18-833	■	Surface de bulles d'air ≤ 5% de la surface totale
2	Fluage en compression à 23°C et 70°C	XP P 18-835	■	Après 3 mois le déplacement des deux plaques d'appui ≤ 0,5 mm (déformation relative de 1%) si la courbe déplacement en fonction du temps est stabilisée (asymptote horizontale)

Tableau n° 27 : d'après la norme P 18-822

3.3.3.9 Choix des armatures passives additionnelles internes au béton

3.3.3.9.1 Généralités

> Les différentes catégories d'armatures de béton armé relèvent des normes suivantes :

■ **Norme européenne :**

- **NF EN 10080 :** Aciers pour l'armature du béton – Aciers soudables pour béton armé – généralités.

Normes françaises :

- **XP A 35-014 :** Armatures pour béton armé - Barres et couronnes lisses, à verrous ou à empreintes en acier inoxydable ;
- **NF A 35-015 :** Armatures pour béton armé - Ronds lisses soudables ;
- **NF A 35-016-1 :** Aciers pour béton armé – Aciers soudables à verrous – Partie 1 : barres et couronnes ;
- **NF A 35-016-2 :** Aciers pour béton armé – Aciers soudables à verrous – Partie 2 : treillis soudés ;
- **NF A 35-017 :** Armatures pour béton armé - Barres et fils machine non soudables à verrous ;
- **NF A 35-019-1 :** Armatures pour béton armé - Armatures constituées de fils soudables à empreintes - Partie 1 : Barres et couronnes ;
- **NF A 35-019-2 :** Armatures pour béton armé - Armatures constituées de fils soudables à empreintes - Partie 2 : Treillis soudés ;
- **NF A 35-020-1 :** Produits en acier – dispositifs de raboutage ou d'ancrage d'armatures à haute adhérence pour le béton – Partie 1 : prescriptions relatives aux performances mécaniques ;
- **NF A 35-020-2 :** Produits en acier – dispositifs de raboutage ou d'ancrage d'armatures à haute adhérence pour le béton – Partie 2 : méthodes d'essai ;
- **NF A 35-021 :** Acier pour béton - Fils soudables utilisés pour la fabrication d'armatures pour béton ;
- **NF A 35-024 :** Aciers pour béton - Treillis soudés constitués de fils de diamètre inférieur à 5 mm ;
- **XP A 35-025 :** Armatures pour béton armé - Ronds lisses galvanisés à chaud - Barres, fil-machine et fils à haute adhérence, fils constitutifs de treillis soudés galvanisés à chaud ;
- **NF A 35-027 :** Armatures pour béton armé – Armatures ;
- **NF A 35-028 :** Aciers pour béton armé – Treillis raidisseurs ;
- **NF A 35-030 :** Produits sidérurgiques - Barres crénelées à haute adhérence pour poteaux en béton armé support de ligne ;
- **XP A 35-031 :** Armatures pour béton armé - Barres soudables à verrous de diamètre supérieur à 40 mm ;
- **FD A 35-029 :** Armatures pour béton armé – Assemblages soudés – Qualification d'un mode opératoire de soudage – Qualification des soudeurs ;
- **ISO 14654 :** Armatures en acier pour béton armé avec revêtement époxy.

Les armatures à haute adhérence sont admises à l'usage de **la Marque NF-Armatures pour béton armé gérée par l'Association Française de Certification des Armatures de Béton armé ou AFCAB.**

Il appartient **au marché** de fixer les types d'armatures de béton à mettre en œuvre, si besoin est, sur le chantier de réparation ou de renforcement.

Photo n° 88 : armatures inox coupées façonnées (crédit photo UGITECH S.A.)

3.3.3.9.2 Les armatures en acier inoxydable

Dans le domaine de la réparation, comme dans celui des ouvrages neufs, il est possible d'utiliser des armatures en acier inoxydable au voisinage d'armatures de béton armé classiques, sous réserve de prendre certaines précautions. Il faut en effet éviter la formation de piles galvaniques entre les deux nuances d'acier pouvant entraîner la corrosion des armatures ordinaires[45]. Se reporter à **l'annexe n°3** qui détaille les propriétés des armatures en acier inoxydable.

[45] *Consulter le document T.81 de CIMbéton d'avril 2004 intitulé : béton armé d'inox ainsi qu'un document de septembre 2001 de l'Office fédéral des routes suisse (intitulé : utilisation d'aciers d'armature inoxydables dans les ouvrages en béton) et prendre contact avec un laboratoire spécialisé.*

3.3.3.9.3 Les armatures en acier galvanisé

> Les armatures en acier galvanisé peuvent être utilisées si le risque de corrosion est lié à :

- la carbonatation du béton ;
- la pénétration des chlorures, sous la réserve expresse que la teneur finale du béton en chlorures soit faible ;

S'il y a à la fois carbonatation et pénétration de chlorures, le revêtement de zinc va être soumis à la corrosion par piqûres. Dans ce cas, il est donc préférable de proscrire ce type d'armatures.

Photo n° 89 : armatures en acier galvanisé au Grand Rocher du Zoo de Vincennes (crédit photo D. Poineau)

3.3.3.9.4 Les armatures composites

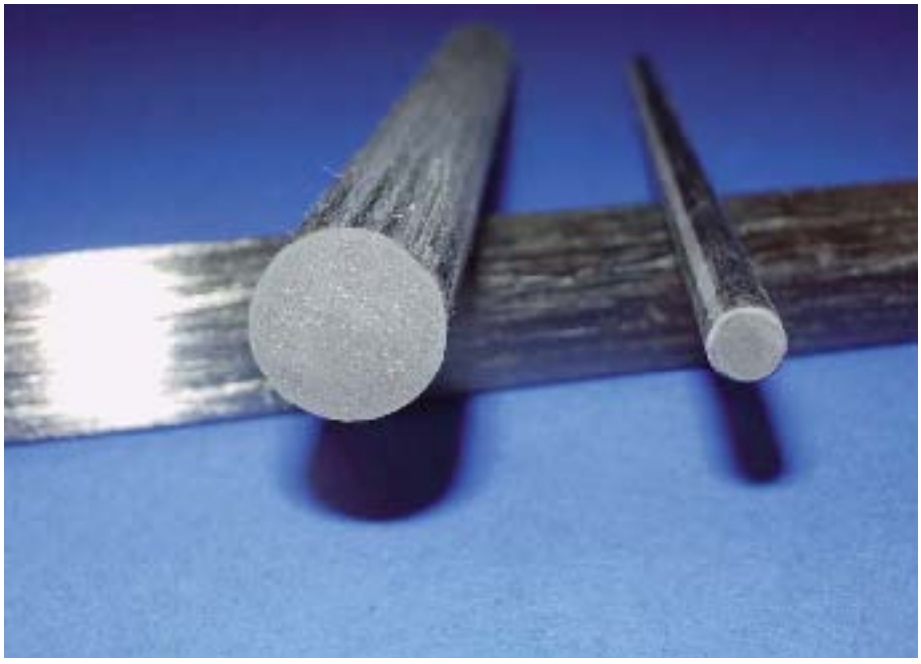


Photo n° 90 : armatures en composites pour béton armé (crédit photo Freyssinet)

Les composites sont constituées de fibres (verre, carbone…) enrobées dans une matrice à base de polymères (résines époxydes, polyesters, phénoliques…). Ces produits présentent une rupture fragile en ce sens qu'ils ne présentent pas de palier plastique (leur limite d'élasticité est confondue avec leur contrainte de rupture).

ATTENTION, *les caractéristiques mécaniques des composites sont nettement moins élevées que celles des fibres à cause de la présence (indispensable) de la matrice de liaison.*

Toutes les armatures proposées par les fabricants ne garantissent pas une adhérence comparable à celle des armatures en acier à haute adhérence. Certaines armatures doivent recevoir un traitement pour avoir un état de surface permettant, soit un ancrage dans le béton, soit un scellement par un mortier à base de résines. D'autres armatures ont un coefficient de forme qui leur permet d'être scellées comme des armatures en acier à haute adhérence.

Les caractéristiques des armatures composites diminuent avec le temps et aussi en fonction du milieu avec lequel ils sont en contact. En cas d'incendie, bien que placées à l'intérieur du béton, dès que leur température dépasse environ 80°C, leurs caractéristiques mécaniques diminuent fortement. Cette température limite (température de transition vitreuse) dépend de la nature du polymère de la matrice.

Principe de dimensionnement : les armatures composites de renforcement sont dimensionnées, non pour atteindre une contrainte limite, mais pour que la déformation totale des armatures en acier existantes (déformation initiale avant renforcement + déformation après renforcement) reste inférieure aux limites des règles de calcul. **Les recommandations de juin 2007 de l'AFGC** explicitent les principes de calcul à appliquer.

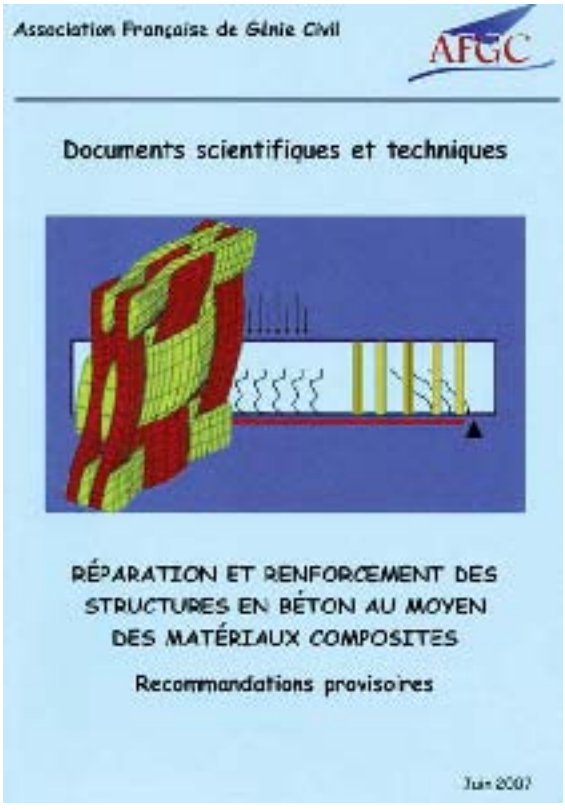


Photo n° 91 : recommandations de l'AFGC sur l'utilisation des composites de juin 2007

3.3.3.10 Choix des armatures passives extérieures au béton et collées

Il s'agit des plats métalliques, des plaques et tissus composites. Se reporter au **GUIDE N°7 [FABEM]** relatif aux armatures passives additionnelles.

Les recommandations de juin 2007 de l'AFGC, qui remplacent celles de décembre 2004, indiquent les caractéristiques des produits et les coefficients d'abattement à prendre en compte pour tenir compte de l'affaiblissement de leurs caractéristiques.

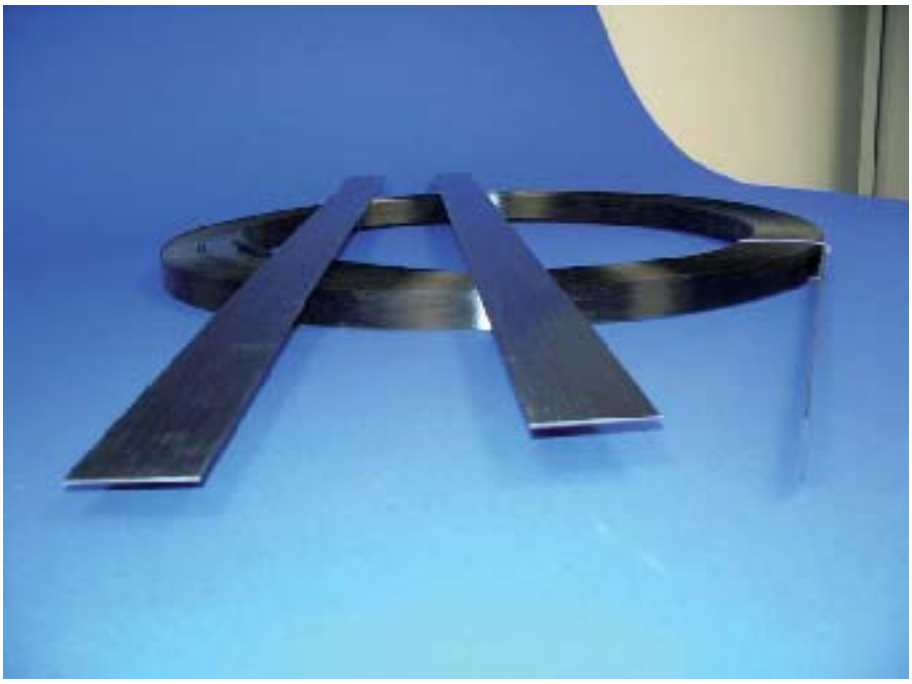


Photo n° 92 : diverses armatures composites sous forme de plaques (crédit photo Freyssinet)

3.3.3.11 Choix des armatures et des systèmes de précontrainte pour l'ajout de forces[46]

3.3.3.11.1 Les armatures de précontrainte

- **Normes européennes :** actuellement, il n'y a pas de norme européenne opérationnelle sur les armatures de précontrainte. Il y a seulement des prénormes (série **prNF EN 10138-1, prNF EN 10138-2, prNF EN 10138-3 et prNF EN 10138-4**) et une norme harmonisée sur les gaines :

  - **NF EN 523 : Gaines en feuillard d'acier pour câbles de précontrainte – terminologie, prescriptions, contrôle de qualité,**

- **Normes françaises :** les normes françaises expérimentales et homologuées sur les armatures de précontrainte actuellement en vigueur sont les suivantes :

  - **XP A 35-045-1 :** Produits en acier – Armatures de précontrainte – Partie 1 : prescriptions générales ;
  - **XP A 35-045-2 :** Produits en acier – Armatures de précontrainte – Partie 2 : fils ;
  - **XP A 35-045-3 :** Produits en acier – Armatures de précontrainte – Partie 3 : torons;
  - **NF A 35-035 :** Produits en acier – Fils lisses et torons de précontrainte à 7 fils revêtus par immersion à chaud de zinc ou d'alliage de zinc ;

[46] *Consulter le guide de l'AFGC sur la durabilité de la précontrainte et sur les solutions de protection à mettre en œuvre (document à paraître en 2009).*

- **XP A 35-037-1 :** Produits en acier à haute résistance protégés par gaines : partie 1 : prescriptions générales ;
- **XP A 35-037-2 :** Produits en acier à haute résistance protégés par gaines : partie 2 : prescriptions spécifiques aux torons protégés gainés coulissants (type P);
- **XP A 35-037-3 :** Produits en acier à haute résistance protégés par gaines : partie 3 : prescriptions spécifiques aux torons protégés gainés adhérents (type SC);
- **Gaines lisses en PEHD** admis à la Marque NF (règlement de la marque NF 114) de classe de pression 1 MPa. Se reporter au chapitre 7 de l'additif au fascicule 65A et aux normes **NF EN 12201-1, NF EN 12201-2 et NF EN 12201-5 ;**

■ **Normes ISO :** deux normes ISO sont à noter[47] :

- **ISO 14655 :** Toron pour la précontrainte du béton avec revêtement époxy ;
- **ISO 14656 :** Poudre époxy et matériau de réparation pour le revêtement des armatures en acier pour béton.

■ **Le cahier des clauses techniques générales :**

Le titre II du fascicule 4 du CCTG relatif aux armatures à haute résistance pour construction en béton précontraint par pré ou post-tension reste donc en bonne partie à la base **de la certification des armatures de précontrainte par l'Association pour la Qualification de la Précontrainte et des Équipements des ouvrages ou ASQPE.** Il existe **un règlement ASQPE** relatif à la certification des armatures de précontrainte (précédemment il s'agissait d'une homologation de la Commission Interministérielle de la Précontrainte ou CIP). Ultérieurement, les armatures de précontrainte feront l'objet d'un **marquage CE.**

Nota : *se reporter* ***au guide sur la durabilité de la précontrainte de l'AFGC*** *(à paraître fin 2008 début 2009) qui donne des conseils sur les différents niveaux de protection des armatures de précontrainte.*

Il existe également des armatures de précontrainte en composite.

3.3.3.11.2 Les procédés de précontrainte

L'ASQPE est chargée de **l'agrément technique des procédés de précontrainte** en remplacement de l'homologation de la CIP et en attendant **un futur agrément technique européen** ou ATE. Cet agrément sera délivré, pour la France, par le **Sétra, l'ASQPE** étant chargée de l'instruction du dossier et des contrôles.

Photo n° 93 : précontrainte provisoire pour le remplacement de la précontrainte extérieure de l'ouvrage de Val Durance (crédit photo D. Poineau)

[47] Ce type de revêtement n'est pas utilisé en France pour les armatures de précontrainte mais peut être utilisé pour la protection des armatures de béton armé contre la corrosion sous réserve de grandes précautions lors de la mise en œuvre pour ne pas endommager le film protecteur. Dès que des agents agressifs sont en contact avec l'armature, tout défaut local crée une anode de petite dimension, siège d'une corrosion caverneuse très dommageable pour l'armature.

3.3.3.12 Choix des produits et systèmes d'ajout de forces par déformations imposées

Article pour mémoire. Les techniques, produits et systèmes utilisés pour de telles opérations sont traités dans le **GUIDE N°8 [FABEM].**

3.3.4 CRITÈRES DE CHOIX SPÉCIFIQUES AUX PRODUITS ET SYSTÈMES DE RESTAURATION OU DE PRÉSERVATION DE LA PASSIVITÉ DES ARMATURES

3.3.4.1 Généralités

Les fonctions auxquelles **un produit ou un système de préservation ou de restauration de la passivité des armatures** doit répondre sont fixées par le marché et contrôlées, si nécessaire, par une **épreuve d'étude[48].**

> Le présent article 3.3.4 traite des produits et systèmes suivants utilisés pour conserver ou restaurer la passivité des armatures :

- Les produits et systèmes utilisés pour remplacer le béton pollué ou carbonaté, augmenter l'enrobage et apporter des alcalins destinés à réalcaliniser le béton par diffusion ;
- les produits et systèmes utilisés lors des traitements électrochimiques : la ré-alcalinisation et la déminéralisation ;
- les produits et systèmes utilisés lors des traitements électrochimiques : la protection cathodique ;
- les produits et systèmes utilisés pour réaliser un revêtement actif ou non sur les armatures;
- les produits et systèmes de type inhibiteurs de corrosion ;
- les produits et systèmes utilisés pour augmenter la résistivité du béton ;
- les produits utilisés pour la réinjection des conduits de précontrainte.

Rappel : avant, mais, le plus souvent après une restauration de la passivité des armatures (combinée ou non à une réparation structurale ou non structurale), il peut être nécessaire de réaliser. :

- un colmatage ou un remplissage ou un pontage des fissures existantes dans le cadre d'une protection contre la pénétration d'agents agressifs. Se reporter, **pour le choix des produits et systèmes, au GUIDE N°2 [FABEM] ;**
- **une protection supplémentaire,** soit contre la pénétration d'agents agressifs et/ou de l'humidité, soit pour augmenter la résistivité du béton et/ou assurer le contrôle cathodique. Cette protection peut être assurée par une imprégnation hydrophobe ou non, un revêtement… Se reporter, **pour le choix des produits et systèmes, au GUIDE N°4 [FABEM].**

[48] Les caractéristiques d'un produit normalisé, même bénéficiant d'une marque de certification ou du marquage CE, ne permettent pas toujours d'assurer les fonctions recherchées pour une structure donnée. Des essais complémentaires sont parfois nécessaires.

3.3.4.2 Choix des produits et systèmes de remplacement du béton carbonaté et/ou pollué ou d'augmentation du recouvrement des armatures pour apporter des alcalins et/ou augmenter la résistivité du béton

Il s'agit des mortiers et bétons, se reporter à l'article 3.3.3 au-dessus.

3.3.4.3 Choix des produits et systèmes nécessaires aux traitements électrochimiques

3.3.4.3.1 Généralités

ATTENTION, ***dans le cas de réparations locales avec remplacement du béton dégradé,*** *les produits ou systèmes de réparation doivent présenter une résistivité électrique voisine de celle du béton de la structure pour permettre une densité de courant homogène (cf. l'article 5.10.4 de la norme* ***NF EN 12696*** *relative à la protection cathodique). Les méthodes de traitements électrochimiques du béton sont effectuées par* ***des procédés d'entreprises qui sont brevetés.***

Les produits à mettre en œuvre sont proposés par ***l'entrepreneur*** *à* ***l'acceptation du maître d'œuvre,*** *qui a lieu après les résultats de* ***l'épreuve de convenance.***

Photo n° 94 : opération de déchloruration

3.3.4.3.2 Cas de la ré-alcalinisation par courant imposé

> Les produits utilisés dans le traitement sont les suivants :

- une anode sous forme d'une grille en acier ou titane,
- des baguettes permettant d'isoler l'anode du parement,
- des fibres cellulosique imprégnées d'une solution de carbonate de soude ([Na2C03] environ 100gr/litres d'eau). Des solutions potassique ou à base de lithium peuvent aussi être utilisées,
- de l'eau pour l'imprégnation de la cellulose et pour le lavage à la fin du traitement ;

Se reporter au fascicule de documentation **FD CEN/TS 14038-1** qui traite de la ré-alcalinisation.

3.3.4.3.3 Cas de l'extraction des chlorures par courant imposé

> Les produits utilisés dans le traitement sont les suivants :

- une anode sous forme d'une grille en acier ou titane,
- des baguettes permettant d'isoler l'anode du parement,
- des fibres cellulosiques imprégnées d'une solution de chaux (eau de chaux),
- de l'eau pour l'imprégnation de la cellulose et pour le lavage à la fin du traitement ;

3.3.4.3.4 Cas de la ré-alcalinisation ou de l'extraction des chlorures par anode sacrificielle

> Les produits utilisés dans le traitement sont les suivants :

- une anode sous forme d'une grille métallique dont le potentiel normal est inférieur à celui des armatures (aluminium ou alliage d'aluminium),
- des baguettes permettant d'isoler l'anode du parement,
- des fibres cellulosiques imprégnées d'une solution permettant à la fois la déchloruration et la ré-alcalinisation, si nécessaire,
- de l'eau pour l'imprégnation de la cellulose et pour le lavage à la fin du traitement ;

Se reporter au fascicule de documentation **FD CEN/TS 14038-1** qui traite de la ré-alcalinisation.

3.3.4.3.5 Cas de la prévention et de la protection cathodique

Rappel : la protection cathodique peut être appliquée sur des ouvrages neufs ou des ouvrages existants qui ne présentent aucune corrosion. Dans ce cas, la protection cathodique a pour rôle la préservation de la passivité des armatures. Dans le cas contraire, si la corrosion est développée, la protection cathodique a pour rôle la restauration de la passivité des armatures.

> Rappel, les procédés de protection cathodiques sont de deux types :

- la protection cathodique par courant imposé ;
- la protection cathodique par anode sacrificielle où les armatures à protéger sont reliées directement à l'anode.

> Rappel, les anodes ou ensembles anodiques au sens de la norme NF EN 12696 peuvent être constituées par :

1) des grilles, bandes, fils, tubes... en titane activé disposés :

- soit à la surface du béton et enrobées dans un **mortier à base de liants hydrauliques,**
- soit dans des rainures, des encoches pratiquées dans le béton et rebouchées par **un mortier à base de liants hydrauliques,**
- soit sous forme

. d'anodes intégrées dans la structure, dans des trous forés dans le béton puis rebouchés par un mortier à base de liants hydrauliques,

. d'anodes avec un enrobage conducteur à base de graphite (carbone),

. d'anodes noyées dans le béton de réparation.

Les mortiers d'enrobage à base de liants hydrauliques de certains des ensembles anodiques susvisés doivent satisfaire aux dispositions de la norme **NF EN 1504-3,** en particulier en matière d'adhérence. De plus, leur résistivité doit rester comprise entre 50% et 200% de celle du béton de la structure, sans dépasser 100Ω. Enfin, leurs caractéristiques mécaniques doivent être voisines de celles du béton de la structure. Bien entendu, le mortier ne doit pas contenir de poudres ou fibres métalliques, afin d'éviter les courts-circuits (dans le cas où, au cours des travaux, les armatures de la structure sont mises à jour, il faut disposer des fixations non métalliques pour les isoler des anodes).

2) un revêtement conducteur :

- à base de résines synthétiques enrobant les anodes dites primaires (épaisseur du film entre 250 et 500µ),
- métallique à base de zinc mis en place par métallisation, voire en alliage de zinc ou en titane activé (épaisseur du film entre 150 et 200 µ),
- à base de graphite conducteur enrobant des anodes ou des tiges de titane platiné.

Nota : *d'autres ensembles anodiques peuvent être utilisés, mais ne sont pas d'un usage courant. Se reporter à* ***l'annexe C informative*** *de la norme.*

Les produits à mettre en œuvre sont proposés par **l'entrepreneur** à **l'acceptation du maître d'œuvre,** qui a lieu après les résultats de **l'épreuve de convenance.**

3.3.4.4 Choix des produits et systèmes de revêtement actif ou non des armatures de béton armé

> Rappels, il s'agit d'un contrôle des zones anodiques, pour les empêcher de participer à la réaction, à l'aide :

- **d'un revêtement actif** qui contient des pigments électrochimiquement actifs, c'est-à-dire susceptibles d'agir comme inhibiteurs ou pouvant assurer une protection cathodique localisée ;
- **d'un revêtement étanche** qui isole l'armature de l'eau interstitielle du béton.

Suivant le type de revêtement (actif ou étanche), **la nature des produits** (à base des résines de synthèse ou de liants hydrauliques…), **la participation des armatures au fonctionnement de la structure,** le produit ou le système devra satisfaire **à des exigences de performances communes** pour **toutes les utilisations prévues** (marquées par «■») et, en plus, **à des exigences de performances particulières** pour **certaines utilisations prévues** dans la norme (marquées par «□»). Ces exigences et leur niveau figurent dans le tableau ci-dessous extrait de la norme **NF EN 1504-7.**

Méthodes d'essai	Caractéristiques de performance	Utilisations prévues		Exigences
		Revêtements actifs	Revêtements étanches	
NF EN 15183	Protection contre la corrosion	Sans objet	■	L'essai est jugé satisfaisant si les zones revêtues sont exemptes de corrosion et si la corrosion sous-jacente au niveau des bords meulés est < 1 mm
NF EN 12614	Température de transition vitreuse	□	□	Au moins 10°C[49] au dessus de la température de service (concerne les produits à base de résines de synthèse)
NF EN 15184	Adhérence par cisaillement (de l'acier revêtu sur le béton)	□	□	La contrainte d'adhérence sur barres revêtues est au moins égale à 80% de la contrainte d'adhérence sur barres non revêtues. La valeur mesurée est la contrainte d'adhérence pour un déplacement de 0,1 mm

Tableau n° 28 : exigences de la norme EN 1504-7

À titre indicatif, le tableau suivant, extrait **d'un document de septembre 2001 de l'Office fédéral des routes suisse** sur l'utilisation des armatures en acier inoxydable dans les ouvrages en béton, donne des critères de choix sur différentes solutions de conservation de la passivité des armatures dans le cas d'un ouvrage neuf ou lors du remplacement des armatures corrodées d'un ouvrage existant. **Il ne donne pas de solution sur la restauration de la passivité par l'application, après décapage, sur les barres corrodées de produits actifs ou non.**

[49] Erreur dans le tableau 3 de la norme qui indique 10 K au dessus de la température de service maximale

Types d'armatures		WS	BK	Béton carbonaté					
				Non	Oui	Non	Oui	Oui (1)	Oui (1)
				Teneur en chlorures (2)					
				Nulle	Nulle	Faible	Faible	Moyenne	Élevée
Armatures en acier normal		0	0	+	-	+ /-	(-)	-	-
Armatures revêtues de résine époxydique		0	?	Barrière uniquement physique sensible aux blessures et possible perte d'adhérence aux aciers dans le temps					
Armatures en acier galvanisé		0	0 / 1	+	+	(+)	-	-	-
Armatures en acier inoxydable :	Au Cr (3)	10-16	1	+	+	+	(+ / -)	(+ / -)	-
	Au Cr+Ni ou Cr+Ni+Mo	17-22	2	+	+	+	+	+	(+)
	Au Cr+Ni+Mo	23-30	3	+	+	+	+	+	+
	Au Cr+Ni+Mo	> 31	4	Cas particuliers pour teneur en chlorures très élevée ou teneur en chlorures élevée et conditions défavorables (partie inaccessibles, fissuration avec écoulements d'eau…)					

Tableau n° 29 : tableau extrait d'un document de L'OFRS

Notes :

WS est l'indice de résistance aux piqûres ***(cf. l'annexe n°3) ;***

BK est la classe de résistance à la corrosion ***(cf. l'annexe n°3) ;***

(1) enrobages importants, les effets de la carbonatation est secondaire par rapport à celle des chlorures ;

(2) les teneurs en chlorures sont données dans l'annexe n°3 ;

(3) la sensibilité aux piqûres augmente lorsque le pH diminue. La carbonatation joue donc un rôle plus ou moins important.

Il appartient au marché de fixer **les exigences de performances** et **les niveaux des attestations de conformité** nécessaires en fonction de l'usage prévu et de la mise en œuvre. **Pour ce faire, il est indispensable d'analyser les deux tableaux ci-devant.**

3.3.4.5 Choix des produits et systèmes inhibiteurs de corrosion applicables sur les bétons

Définition : un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qui, appliqué dans des quantités adaptées, si possible faibles, sur le béton à proximité d'aciers corrodés, stoppe ou retarde leur corrosion et ne montre aucun effet secondaire sur les propriétés du béton au niveau microscopique comme macroscopique.

Rappel, les inhibiteurs peuvent être mis en œuvre dans le béton frais lors de la construction d'un ouvrage neuf très exposé, ils peuvent être appliqués à la surface des armatures (voir l'article 3.3.4.4 ci-devant) et également à la surface du béton lors d'une réparation.

> Les inhibiteurs peuvent être à base de molécules :

- soit organiques (aminoalcools, sels aminés d'acides carboxyliques, glycérophosphates de lithium, glucoheptonates). **Ils se classent dans le groupe des inhibiteurs anodiques ;**
- soit minérales (monofluorophosphates désignés par le sigle «MFP», nitrites de sodium ou de calcium, etc.). **Ils se classent dans le groupe des inhibiteurs cathodiques non oxydants.**

Les produits du commerce contiennent souvent des mélanges de composants qui peuvent avoir à la fois un effet anodique et un effet cathodique.

L'article 3.2.6.3.3 ci-devant précise les limites d'emploi de cette technique et de certains des produits et systèmes utilisés.

En l'absence de norme de performance et de guide de choix, il appartient **au marché** de fixer, en fonction des résultats des études effectuées de mise au point du projet de réparation, les catégories de produits et systèmes pouvant être utilisés. Les produits et systèmes à mettre en œuvre sont proposés par **l'entrepreneur à l'acceptation du maître d'œuvre,** qui a lieu après les résultats de **l'épreuve de convenance.**

3.3.4.6 Choix des produits et systèmes pour la réinjection de conduits de précontrainte

Se reporter au **GUIDE N°8 [FABEM]** relatif aux armatures de précontrainte additionnelles.

3.3.5 EXIGENCES CONCERNANT LES CONSTITUANTS ET LES PRODUITS CONNEXES

3.3.5.1 Généralités

Cet article concerne **les principaux composants** utilisés pour la fabrication ou la mise en œuvre des produits et systèmes de réparation. Ces composants doivent être conformes **aux normes en vigueur** complétées, si nécessaire, par les exigences **du marché.**

Rappel important : dans un marché, la référence à une norme ne suffit pas, puisque plusieurs niveaux de performance peuvent être exigés d'un même produit. Il convient d'analyser la norme concernant le produit et de se reporter aux DTU et fascicules du CCTG, qui donnent souvent les niveaux de performance à exiger et des conseils sur les documents et guides à consulter.

> Les composants suivants font l'objet du présent article :

- les granulats pour béton ;
- les liants hydrauliques ;
- les additions ;
- les fibres
- les adjuvants ;
- l'eau de gâchage ;
- les résines synthétiques.

Les normes citées ci-après couvrent les différents domaines de la construction (le bâtiment et le génie civil) ainsi que les différents usages des différents produits (par exemple, adjuvants pour mortiers et adjuvants pour bétons). **Le marché doit uniquement faire références aux normes en rapport direct avec l'objet des travaux et aux documents complémentaires qui s'imposent.**

3.3.5.2 Les granulats pour bétons et mortiers

Les granulats pour bétons et mortiers doivent être conformes aux spécifications des normes suivantes : **NF EN 12620** : Granulats pour béton, **NF EN 13055-1** : Granulats légers – Partie 1 : granulats légers pour bétons et mortiers, **XP P 18-545** : Granulats – Éléments de définition, conformité et codification.

Plusieurs niveaux de performances sont fixés par les normes granulats. Des choix s'imposent en fonction de l'utilisation du produit ou système de réparation dans lequel sont incorporés des granulats (par exemple, en matière de résistance au gel-dégel avec ou sans sels de déverglaçage, à l'alcali-réaction, à l'abrasion…).

3.3.5.3 Les liants hydrauliques

Les liants hydrauliques courants doivent être conformes aux spécifications des normes suivantes : **NF P 15-300, NF P 15-301** supports de la **Marque NF- Liants hydrauliques - Ciments** (se reporter au référentiel **NF 002**). Voir également les normes **NF P 15-302, NF EN 197-1, NF EN 14216, NF EN 197-4, NF EN 413-1** ainsi que les normes **NF P 15-306 à NF P 15-319** (ciments pour divers usages, en particulier en présence de milieux agressifs pour les bétons, par exemple dans les travaux à la mer, en présence d'eaux à haute teneur en sulfates…),

3.3.5.4 Les additions

Les additions doivent être conformes aux spécifications des normes **NF EN 450-1, NF EN 450-2, NF EN 13263-1** (fumées de silice pour béton), **NF EN 12363-2** et pour la conformité du produit les normes **NF P 18-506, NF P 18-508 et NF P 18-509.**

Les ajouts ou additions doivent être compatibles avec le support ou la couche d'accrochage, le liant et les granulats (par exemple, les cendres volantes ne sont pas compatibles avec la résistance aux effets du gel-dégel). L'incorporation in situ d'ajouts ou d'additions est une opération délicate qui peut modifier formule et performances finales. Elle doit être réalisée suivant les spécifications du fabricant par un personnel utilisant un matériel adéquat. On peut citer les charges thixotropantes et les charges minérales telles que cendres, fillers, fumées de silice.

3.3.5.5 Les fibres

Les fibres doivent être conformes aux spécifications des deux normes suivantes : **NF EN 14889-1** (fibres en acier) et **NF EN 14889-2** (fibres en polymères).

D'autres fibres peuvent être utilisées comme les fibres de verre et de carbone et, dans les traitements électrochimiques, les fibres de cellulose.

Photo n° 95 : exemple de fibres métalliques en fonte (crédit photo D. Poineau)

3.3.5.6 Les adjuvants

Les adjuvants doivent être conformes aux spécifications des normes suivantes : **NF EN 934-2** (définitions, exigences…), **NF EN 934-3** (adjuvants pour mortiers à maçonner), **NF EN 934-4** (adjuvants pour coulis de précontrainte), NF EN 934-5 (adjuvants pour bétons projetés) et **NF EN 934-6** (contrôle) ainsi qu'à la norme **XP P 18-340** (adjuvants – adjuvants spéciaux pour bétons – définitions, spécifications et critères de conformité) et à la norme **NF P 18-370** relative aux produits de cure.

3.3.5.7 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage des mortiers et bétons doit être conforme aux spécifications de la norme **NF EN 1008.**

3.3.5.8 Les résines synthétiques

Les résines synthétiques ne font pas l'objet d'une norme de spécification, mais elles doivent satisfaire lorsqu'elles sont utilisées seules ou en mélanges, aux diverses normes d'essai visées dans les normes de la série **NF EN 1504-**.**

Photo n° 96 : boîtes de résines base et durcisseur (crédit photo Freyssinet)

3.3.6 ÉPREUVE D'ÉTUDE

Les produits prêts à l'emploi et conformes aux normes en vigueur, admis à une **marque de certification, telle que la Marque NF-Produits Spéciaux** destinés à la construction en béton hydraulique ou une marque équivalente, dans le mesure où le champ d'application de celles-ci couvre les besoins du chantier ou encore faisant l'objet **d'un Avis Technique, ne font normalement pas l'objet d'une épreuve d'étude.**

> Cette épreuve est cependant requise si :

- les conditions de contrôle ne sont pas adaptées ;
- les conditions de mise en œuvre du produit, en particulier la géométrie et l'orientation du support, les sollicitations imposées aux fissures, les conditions climatiques et hygrométriques, ne correspondent pas à celles fixées par les normes **(applications particulières ou non prévues) ;**
- ces produits, une fois mis en œuvre, seront soumis à des sollicitations mécaniques spécifiques ou en contact avec un milieu agressif particulier…

Les produits non normalisés ou fabriqués sur le chantier doivent faire l'objet **d'une épreuve d'étude en laboratoire** pour s'assurer qu'ils satisfont bien **aux exigences du marché** dans les conditions de mise en œuvre prévues (température et hygrométrie en particulier).

Les résultats d'une épreuve d'étude récente (quelques mois) effectuée **sur un chantier identique** peuvent servir de référence si **le marché** l'autorise.

Dans le cas où **une épreuve d'étude** doit avoir lieu, elle est fixée par **le marché.** Sa consistance s'inspire des essais visés par les normes en vigueur et des conditions de mise en œuvre des produits.

L'acceptation de **l'épreuve d'étude** par **le maître d'œuvre** fait l'objet d'un **POINT D'ARRÊT.**

3.4.1 LES DIFFÉRENTS PRODUITS

> Différents types de matériaux, produits et systèmes de produits sont nécessaires pour la réalisation d'une réparation ou d'un renforcement d'une structure en béton, béton armé ou béton précontraint. Tous ces matériaux et produits ont été listés dans l'article 3.3.3 ci-devant relatif au choix des produits et systèmes. Il s'agit :

- **des produits et systèmes utilisés pour la réparation et le renforcement du béton (mortiers et bétons, produits de collage...) ;**
- **des produits et systèmes utilisés pour préserver ou restaurer la passivité des armatures ;**
- **des matériaux et produits de base utilisés pour la fabrication de la plupart des produits et systèmes des deux catégories précédentes et, en particulier, les mortiers et les bétons.**

A ceci s'ajoutent les produits et systèmes nécessaires au nettoyage et à la préparation des surfaces à traiter (produits de nettoyage, biocides, solvants abrasifs...), ceux nécessaires pour nettoyer les matériels utilisés, ceux pour assurer la protection et la cure des mortiers et bétons mis en œuvre...

3.4.2 CONDITIONNEMENT DES PRODUITS PRÊTS À L'EMPLOI

3.4.2.1 Généralités

Les produits de nettoyage liquides ou sous forme de gels sont livrés en jerricans, bidons ou fûts.

Les produits de préparation des supports, suivant leur forme (liquide, poudre...), sont livrés en sacs, bidons, jerricans...

Les solvants sont livrés en jerricans, bidons, fûts... En général, ils sont facilement inflammables, nocifs par inhalation... Des précautions particulières s'imposent donc. Se reporter **aux fiches de sécurité (FDS).**

Les mortiers à base de liants hydrauliques modifiés **(PCC)** sont livrés en sacs ou en seaux et les produits servant au gâchage en seaux ou en bidons.

Pour les produits à plusieurs composants (deux ou trois), tels que les mortiers à base de liants organiques, les produits de collage... (deux ou trois), devant être mélangés dans leur totalité avant leur emploi, les boîtes des composants doivent être réunies sous un emballage unique et avoir des capacités telles que le mélange puisse être effectué sans avoir à verser leur contenu dans un récipient additionnel.

Les produits doivent être livrés en récipients d'origine, parfaitement hermétiques, prédosés. Si les produits sont en pots, ils doivent disposer de tambours à ouverture totale.

Les armatures de béton armé et de précontrainte, les armatures industrielles pour béton, le béton prêt à l'emploi, les granulats… sont livrés conformément **aux normes en vigueur** complétées par les exigences des textes de mise en œuvre, tels que **le fascicule 65 A et les DTU, voire du marché.**

Le marché, si besoin est, impose **des conditionnements particuliers** lorsque les matériaux, les produits et les systèmes risquent d'être soumis pendant leur transport et leur stockage à des environnements nocifs à la conservation de leur propriétés (par exemple, conditionnement des armatures de précontrainte dans le cas d'un transport maritime…).

3.4.2.2 Marquage – Étiquetage

■ RÉFÉRENCES NORMATIVES

- **Cas des produits et systèmes relevant de la série des normes NF EN 1504-**, voire d'autre normes européennes harmonisées :**

> La norme NF EN 1504-8 relative à la maîtrise de la qualité et l'évaluation de la conformité impose :

«Lorsque les produits et les systèmes de protection et de réparation du béton sont fournis dans des conteneurs, ceux-ci doivent porter un marquage clair donnant les informations suivantes. Lorsque le matériau est fourni en vrac dans un conteneur au point de livraison, ces mêmes informations doivent être fournies par écrit au moment de la livraison :

- le nom, l'adresse, l'appellation commerciale et tout autre moyen d'identification du fabricant ou de son représentant agréé établi dans l'EEE, ainsi que le lieu de production ;
- l'identification du produit, c'est-à-dire la marque de fabrique, le numéro du lot ;
- le type du produit ou du système et le numéro, la date et la partie appropriée de l'**EN 1504-**** ;
- un résumé des exigences relatives au stockage, avec les exigences concernant la durée du stockage clairement marquées, par exemple : «Ce produit ne doit plus être considéré comme conforme à **l'EN 1504-**** après le …» ;
- des recommandations relatives à l'emploi, y compris toutes précautions particulières concernant l'utilisation et les mesures de sécurité imposées par les réglementations locales.»

***«NOTE :** pour le marquage CE, se référer à l'annexe ZA des normes de produits appropriées».*

> Les annexes ZA des différentes normes produits de la série NF EN 1504-* * imposent :

«Le fabricant ou son représentant attitré établi dans l'EEE est responsable de l'apposition du marquage CE. Le symbole du marquage CE à apposer doit être conforme à la Directive 93/68/CE et doit être visible sur le produit de réparation (ou, si ce n'est pas possible, il peut être apposé sur l'étiquette, l'emballage ou la documentation commerciale, par exemple, le bon de livraison). Le symbole du marquage CE doit s'accompagner des informations suivantes :

- le numéro d'identification de l'organisme de certification (seulement pour les produits relevant des systèmes 1+, 1 et 2+) ;
- le nom ou la marque d'identification et l'adresse déclarée du fabricant ;
- les deux derniers chiffres de l'année d'apposition du marquage ;
- le numéro du certificat CE de conformité ou du certificat de contrôle de la production en usine (le cas échéant) ;
- la référence à la présente norme européenne ;
- la description du produit : nom générique, matériau, dimensions, … et utilisation prévue ;
- les informations sur les caractéristiques essentielles pertinentes énumérées dans le Tableau ZA.1 qui doivent faire l'objet de la déclaration en étant présentées sous la forme suivante :

. valeurs déclarées et, le cas échéant, niveau ou classe (y compris «satisfaisant» pour les exigences satisfaisant/non satisfaisant) à déclarer pour chaque caractéristique essentielle, comme indiqué dans les «Notes» du Tableau ZA.1,

. la mention «Performance Non Déterminée» pour les caractéristiques concernées,

. ou bien, une désignation standard indiquant une partie ou la totalité des caractéristiques pertinentes (lorsque la désignation couvre seulement certaines caractéristiques, il sera nécessaire de les compléter par des valeurs déclarées pour les autres caractéristiques, comme ci-dessus)».

«L'option «Performance Non Déterminée» ne peut pas être utilisée lorsqu'un seuil s'applique à la caractéristique. Au contraire, elle peut être utilisée lorsque, pour un certain usage prévu, la caractéristique ne relève pas d'une réglementation dans l'État membre de destination».

Remarque : *suivant le niveau du* ***système d'évaluation de la conformité*** *(2+ ou 4) et (1, 3 ou 4 qui se rapportent à la réglementation en matière de réaction au feu), l'annexe ZA exige du fabricant ou de son représentant attitré établi dans l'EEE l'établissement* ***d'une déclaration de conformité*** *et, s'il y a intervention d'un organisme de contrôle extérieur, l'établissement par celui-ci d'un certificat de conformité.*

La forme et le contenu de ces documents figurent dans l'annexe ZA. Ces documents sont conservés par le producteur auquel il est possible de demander un duplicata. Le numéro d'enregistrement figure sur les étiquettes des produits.

- **Cas des produits et systèmes relevant d'une norme européenne non harmonisée (par exemple, les bétons...) ou d'une norme française (par exemple, les produits de calage, les armatures de béton armé...) :**

Le marquage et/ou l'étiquetage doivent être conformes **aux spécifications de la norme en vigueur** complétée, si besoin est, par les exigences **du règlement de certification du produit** dans le cas où une certification a été mise en place (par exemple, **la Marque NF** relative aux armatures de béton armé). Il en est ainsi de la norme homologuée **NF P 18-800** (relative aux définitions, conditionnement marquage et conditions de réception des produits spéciaux destinés aux réparations), qui fixe les conditions minimales **d'étiquetage des produits et qui est complétée par la Marque NF-Produits Spéciaux.**

■ SYNTHÈSE DES OBLIGATIONS

Il convient donc pour résumer de superposer les exigences de la norme produit avec celles **du marquage CE** lorsque celui-ci est applicable, voire d'autres documents. **Ces indications doivent être rédigées au moins en langue française et donner les informations suivantes :**

■ le nom, l'adresse, l'appellation commerciale et tout autre moyen d'identification du fabricant ou de son représentant agréé établi dans l'EEE, ainsi que le lieu de production ;

■ l'identification du produit, c'est-à-dire la marque de fabrique, le numéro du lot ;

■ le type du produit ou du système et le numéro, la date et la partie appropriée de la norme correspondante (expérimentale, homologuée, harmonisée...) ;

■ un résumé des exigences relatives au stockage, avec les exigences concernant la durée du stockage clairement marquées, par exemple : «Ce produit ne doit plus être considéré comme conforme à la norme après le ...» ;

■ des recommandations relatives à l'emploi, y compris toutes précautions particulières concernant l'utilisation et les mesures de sécurité imposées par les réglementations locales.»

■ pour les produits à plusieurs composants, l'indication de l'obligation de les mélanger dans leur totalité, sauf indication contraire du producteur ;

■ la masse ou le volume net du produit de type monocomposant ou, pour les produits à plusieurs composants, la masse ou le volume net total ;

■ ainsi que :

- pour les produits à base de liants hydrauliques, la quantité d'eau de gâchage prévue selon le ou les usages du produit correspondant à l'unité de conditionnement,

- pour les produits à base de résines synthétiques, la durée pratique d'utilisation (DPU);

■ Il faut y ajouter conformément à la législation française les pictogrammes réglementaires de danger «irritant, nocif, corrosif, inflammable...» associés à des phases de risques [R] et à des conseils de sécurité [S] ;

■ il faut y ajouter également :

- pour les produits et systèmes visés par une ou des normes harmonisées et donc tributaires du marquage CE :

. le numéro d'identification de l'organisme de certification (seulement pour les produits relevant des systèmes 1+, 1 et 2+),

. les deux derniers chiffres de l'année d'apposition du marquage,

. le numéro **du certificat CE de conformité** ou du certificat de contrôle de la production en usine (le cas échéant),

. la référence à la norme européenne,

. la description du produit : nom générique, matériau, dimensions, … et utilisation prévue,

. les informations sur les caractéristiques essentielles pertinentes énumérées dans le Tableau ZA.1 qui doivent faire l'objet de la déclaration (voir ci-devant la forme de la présentation) ;

- le cas échéant, le sigle de **la Marque NF** de conformité aux normes correspondantes apposé dans les conditions prévues au règlement particulier de cette marque[50];

Dans le cas ou l'étiquetage est incomplet, **les fiches techniques** renseignées doivent être fournies.

Stockage - Conservation

Consommation

Mode d'emploi

Conditions d'utilisation

Préparation du support

Préparation du mélange

Mode pratique d'utilisation

10°C	> 6h minimum
20°C	3h minimum

Photo n° 97 : extrait d'une fiche technique (document Sika Top 122)

[50] Pour les marchés publics, il faut admettre les marques de certification équivalentes (la preuve est du ressort du producteur).

3.4.3 CONDITIONNEMENT DES PRODUITS FABRIQUÉS SUR LE CHANTIER

Les différents composants et constituants qui servent à la fabrication foraine des produits doivent être livrés dans des récipients ou containers adaptés aux quantités à mettre en œuvre, parfaitement nettoyés pour éviter toute pollution et suffisamment solides pour éviter tout mélange accidentel. Chaque composant doit être facilement identifiable (étiquette, marquage indélébile, etc.) de façon à éviter toute confusion. Si besoin est, **le marché** impose des exigences particulières.

L'entrepreneur propose **le conditionnement** à l'acceptation **du maître d'œuvre.**

3.5.1 GÉNÉRALITÉS

Les produits doivent être livrés sur le chantier suffisamment à l'avance pour permettre d'effectuer **les essais et contrôles** prévus **par le marché et la procédure correspondant aux travaux à effectuer.**

1ER CAS : la majeure partie des produits et systèmes de réparation structurale et non structurale et de restauration ou conservation de la passivité des armatures ainsi que des produits connexes tels que ceux nécessaires à la préparation des surfaces, au nettoyage des outils... sont des produits prêts à l'emploi dont les conditions de transport de livraison et de stockage peuvent être précisées par les normes en vigueur.

Par exemple, pour **les produits spéciaux pour béton,** l'examen de la norme française **NF P 18-800** et du fascicule de documentation **FD P 18-802** montre que ces deux textes imposent des spécifications précises mais uniquement sur leur réception. L'examen des normes européennes de la série **NF EN 1504-**** et **les annexes ZA** montre que celles-ci traitent surtout **du contrôle en usine et quasiment pas de la réception sur le chantier** des produits et systèmes de réparation.

Compte tenu de la relative faiblesse des exigences des normes, il est donc nécessaire que le marché impose celles de l'article 3.5.2 ci-après.

2ÈME CAS : les autres produits de réparation, tels que les granulats, bétons, les armatures... relèvent également des normes, voire de règlements de certification et aussi des documents, tels que les DTU et fascicules du CCTG.

Par exemple, pour **les bétons livrés sur le chantier,** l'examen de la norme européenne **NF EN 206-1** traite des conditions de livraison mais ne s'attarde pas sur les conditions de transports. Le **DTU 21** se contente de renvoyer à la norme **NF EN 206-1.** Seul **le fascicule 65A** traite dans leur ensemble des conditions de transport, stockage et manutention des bétons. La même constatation peut être faite pour les granulats et les armatures.

Compte tenu de ce constat, il est donc nécessaire que **le marché** fixe des règles en faisant appel aux clauses **du fascicule 65A.**

Les exigences relatives **à la réception des produits et systèmes** sont développées dans la partie **«ESSAIS ET CONTRÔLES»** du présent guide.

La réception des produits, systèmes, matériaux... fait l'objet d'un **POINT D'ARRÊT.**

3.5.2 PRODUITS ET SYSTÈMES DE RÉPARATION ET DE PASSIVATION DES ARMATURES ET PRODUITS DIVERS (NETTOYAGE...)

Les produits doivent être transportés puis stockés en suivant les prescriptions fixées par **la fiche technique du produit, la FDS et l'étiquette de sécurité,** en particulier vis-à-vis du point éclair. **Le marché** complète, en tant que de besoin, ces prescriptions.

Certains produits, s'ils sont transportés en ne respectant pas les conditions prescrites vis-à-vis de la température (par exemple en cas de gel), peuvent **ne pas être récupérables** alors que d'autres produits peuvent retrouver leurs caractéristiques initiales. **L'entrepreneur** impose **au transporteur** de respecter les consignes et d'équiper le véhicule des moyens de mesure permettant de démontrer que les consignes ont été respectées.

En principe, les produits sont stockés à l'abri du soleil et du froid et en respectant les températures exigées (en général, entre 10 et 25°C). Le local de stockage doit être fermé mais aéré. De plus, une signalétique appropriée (par exemple, matières inflammables) doit être apposée sur le local.

3.5.3 AUTRES PRODUITS DE RÉPARATION (BÉTON, ARMATURES...) ET PRODUITS CONNEXES (GRANULATS, ADJUVANTS...)

Les matériaux et les produits doivent être transportés puis stockés en suivant les prescriptions des textes en vigueur complétées par les prescriptions du marché.

3.6.1 GÉNÉRALITÉS

Dans le cadre de la **procédure correspondant aux travaux à réaliser, l'entrepreneur** propose à l'acceptation **du maître d'œuvre** le matériel qu'il compte utiliser dans le respect des dispositions **du marché** et conformément aux stipulations des documents rendus contractuels (normes, fascicules du CCTG, guides techniques…) et des fiches techniques des fabricants[51].

L'état et le bon fonctionnement du matériel doivent être contrôlés par **l'entrepreneur** qui s'assure également de la présence **des fiches techniques et des carnets d'entretien, voire des procès-verbaux de tarage** (manomètres, dispositifs de pesage…). Il présente ces documents **au maître d'œuvre** sur sa demande ou dans les conditions prévues **par le marché** ou les documents rendus contractuels.

> Les différents matériels à utiliser concernent :

- la préparation du support ;
- la préparation des produits et systèmes ;
- la mise en œuvre des produits et systèmes.

Avant tout commencement d'une réparation, si nécessaire, une protection contre **le vent, le soleil ou la pluie** est à mettre en place. Ces exigences figurent normalement dans **la fiche technique du produit ou du système.** Dans le cas des produits fabriqués sur chantier, il faut appliquer les mêmes précautions que pour les produits prêts à l'emploi du même type (base de liants hydrauliques ou organiques).

3.6.2 MATÉRIELS DE PRÉPARATION DU SUPPORT

Ce sujet, qui est largement développé dans **le GUIDE N°4 [FABEM]** fait l'objet de l'article 4.2 ci-après dans la partie consacrée aux **«MODES OPÉRATOIRES».**

3.6.3 MATÉRIELS DE PRÉPARATION DES PRODUITS

Nota : *faute d'un intérêt technique fort pour le lecteur, le présent article ne détaille pas pour chaque produit et chaque système les matériels nécessaires à leur préparation. Il ne traite que du matériel nécessaire à la préparation des trois grandes familles de produits et systèmes.*

[51] Le marché vise en tant que de besoin les fiches techniques de fabricants, les normes, les fascicules du CCTG, les guides techniques en totalité ou en partie…

Rappel : avant, mais, le plus souvent après, une réparation structurale ou non structurale et/ou une restauration de la passivité des armatures, il peut être nécessaire de réaliser :

- un colmatage ou un remplissage ou un pontage des fissures existantes dans le cadre d'une protection contre la pénétration d'agents agressifs. Se reporter, **pour le choix du matériel de préparation des produits et systèmes, au GUIDE N°2 [FABEM] ;**

- **une protection supplémentaire,** soit contre la pénétration d'agents agressifs et/ou de l'humidité, soit pour améliorer la résistance physique et/ou chimique, voire pour augmenter la résistivité et/ou assurer un contrôle cathodique. Cette protection peut être assurée par une imprégnation hydrophobe ou non, un revêtement… Se reporter, pour **le choix du matériel de préparation des produits et systèmes, au GUIDE N°4 [FABEM].**

3.6.3.1 Généralités

Les produits et systèmes (pour réparation structurale ou non et pour restauration ou préservation de la passivité des armatures) **imposent, pour leur préparation,** selon qu'ils sont à base de liants hydrauliques modifiés ou non, à base de liants organiques, fabriqués en usine ou sur le chantier en petite ou grande quantité et mis en œuvre manuellement ou mécaniquement, **un certain type de matériel.**

Pour les produits prêts à l'emploi, **la fiche technique** indique quels sont les outils et matériels à utiliser.

Pour les produits fabriqués sur le chantier, **l'entrepreneur** propose, **en temps utile,** à l'acceptation **du maître d'œuvre** le matériel de fabrication et ce, dans le respect des exigences **du marché.**

Les produits utilisés lors de la mise en œuvre **des méthodes particulières de réparation** que sont les traitements électrochimiques, l'application d'inhibiteurs de corrosion…, doivent être préparés avec le matériel prévu dans **la fiche technique du procédé,** le plus souvent breveté. **L'entrepreneur** remet, en temps utile, à l'acceptation **du maître d'œuvre la procédure de préparation des produits.**

Les matériels de préparation des produits et systèmes visés par le présent guide mais traités dans les autres **GUIDES STRRES** figurent dans les guides correspondants. C'est le cas pour les produits de protection des bétons, pour les produits de réinjection des conduits de précontrainte…

Les produits et matériaux traditionnels, comme les bétons, les armatures industrielles pour béton, les cages d'armatures réalisées sur chantier…, sont fabriqués conformément aux normes et textes en vigueur complétés par les exigences particulières **du marché** (se reporter, en particulier, **au fascicule 65A et au DTU 21).**

La préparation et la mise en œuvre des produits non traditionnels tels que les BAP, les BFUP imposent que **le marché** fixe les règles à respecter.

3.6.3.2 Matériels de préparation de produits prêts à l'emploi de type monocomposant à base de liants organiques

L'homogénéisation de ces produits est généralement obtenue en les remuant manuellement ou avec **un agitateur à faible vitesse de rotation**[52] (quelques centaines de tours par minutes pour éviter l'inclusion d'air dans le mélange) jusqu'à l'obtention d'une teinte uniforme.

3.6.3.3 Matériels de préparation de produits prêts à l'emploi multicomposants à base de liants organiques ou de liants hydrauliques et organiques

Les produits à base de résines sont livrés dans des emballages regroupant une boîte contenant la résine et une boîte contenant le durcisseur.

Le plus souvent, le durcisseur est à verser dans **la boîte de résine dont la capacité est adaptée à cet effet.** L'homogénéisation du mélange est obtenue par **un agitateur à faible vitesse de rotation,** pour éviter l'inclusion d'air dans le mélange, en respectant **la durée de malaxage de la fiche technique** (quelques minutes) jusqu'à l'obtention d'une teinte uniforme. Ensuite il faut, en général, aussi respecter **la durée de mûrissement** (quelques minutes) de la fiche technique avant d'utiliser le produit.

Les mortiers et bétons de type PCC sont livrés dans des emballages contenant un bidon de résine et un sac contenant un mélange granulaire (ciment et granulats).

La préparation d'un produit PCC se déroule généralement comme suit : la résine est versée dans un récipient propre, puis on y ajoute le mélange granulaire en remuant le tout avec **un agitateur à faible vitesse de rotation,** pour éviter l'inclusion d'air dans le mélange. Il convient de respecter la durée de malaxage de la fiche technique (quelques minutes) jusqu'à l'obtention d'une teinte uniforme. Ensuite il faut, en général, aussi respecter **la durée de mûrissement** (quelques minutes) de **la fiche technique** avant d'utiliser le produit.

Pour les produits, tels que les mortiers à base de liants organiques, il faut commencer par préparer le mélange résine durcisseur selon les indications de **la fiche technique,** puis y ajouter les charges. Le mélange final est généralement obtenu par **un malaxeur à axe vertical** plus puissant qu'un simple agitateur.

3.6.3.4 Matériels de préparation des produits prêts à l'emploi ou non à base de liants hydrauliques

Pour la fabrication des mortiers et bétons à base de liants hydrauliques, si les quantités à mettre en œuvre sont importantes, le mélange se fait sur le chantier, soit dans une bétonnière, soit dans le malaxeur associé à certaines machines de projection à moteur thermique ou électrique… Le mélange des mortiers peut se faire manuellement dans une auge de maçon lorsque les quantités à mettre en œuvre sont faibles.

[52] *Suivant le type de produit et les risques feu qu'il présente, l'agitateur peut être électrique ou pneumatique.*

Photo n° 98 : préparation d'un mortier de réparation à base de liants hydrauliques

Les mortiers et bétons peuvent aussi être **fabriqués en centrale et livrés sur le chantier** au moyen de bétonnières portées. Les normes et textes en vigueur précisent les caractéristiques que doivent présenter les matériels de fabrication et de transport (se référer, par exemple, à la norme **NF EN 206-1** et au **fascicule 65A).**

Les mortiers traditionnels non prêts à l'emploi sont fabriqués dans **une bétonnière,** voire dans **une auge de maçon.**

3.6.4 MATÉRIELS DE MISE EN ŒUVRE DES PRODUITS

Nota : *les matériels de mise en œuvre des différents produits et systèmes de réparation et de renforcement du béton, ainsi que ceux de préservation et de restauration de la passivité, sont détaillés dans la suite de cet article compte tenu de leurs spécificités. En tant que de besoin, sont effectués les renvois aux normes de référence et aux autres guides du STRRES.*

3.6.4.1 Généralités

Les produits et systèmes (pour réparation structurale ou non et pour restauration ou préservation de la passivité des armatures) **imposent pour leur mise en œuvre,** selon qu'ils sont à base de liants hydrauliques modifiés ou non, à base de liants organiques et selon la quantité à mettre en place, **un certain type de matériel pour une application manuelle ou mécanisée.**

Il est rappelé que **la fiche technique d'un produit ou système prêt à l'emploi** indique quels sont **les différents outils et matériels** nécessaires à sa mise en œuvre ainsi que les réglages nécessaires de ces matériels (par exemple, préparation : humidification ou gobetis d'accrochage…, application : truelle et taloche ou machine à projeter…, finition : taloche, pulvérisateur de produit de cure…).

La fiche peut indiquer également **certaines astuces d'exécution** et quelles sont **les précautions à prendre** afin d'éviter les accidents, les intoxications, les pollutions…

Les matériaux de construction classiques, tels que les armatures de béton armé, les bétons, sont mis en place traditionnellement en respectant les règles de mise en œuvre, soit **du DTU 21,** soit **du fascicule 65A.** Les matériels nécessaires à la mise en œuvre de tels matériaux ne font pas l'objet de développements spécifiques dans le présent document.

Pour certains produits plus innovants, tels les bétons autoplaçants, les bétons fibrés à ultra-hautes performances, les produits composites, il convient de se référer aux guides existants et aux fiches techniques.

> Rappel : avant, mais, le plus souvent après, une réparation structurale ou non structurale et/ou une restauration de la passivité des armatures, il peut être nécessaire de réaliser :

- un colmatage ou un remplissage ou un pontage des fissures existantes dans le cadre d'une protection contre la pénétration d'agents agressifs. Se reporter, **pour le choix du matériel de mise en œuvre, au GUIDE N°2 [FABEM] ;**
- **une protection supplémentaire,** soit contre la pénétration d'agents agressifs et/ou de l'humidité, soit pour améliorer la résistance physique et/ou chimique, voire pour augmenter la résistivité et/ou assurer un contrôle cathodique. Cette protection peut être assurée par une imprégnation hydrophobe ou non, un revêtement… Se reporter, **pour le choix du matériel de mise en œuvre, au GUIDE N°4 [FABEM].**

3.6.4.2 Matériels de mise en œuvre de produits et systèmes de réparation des bétons appliqués en faibles épaisseurs

Lorsque les réparations sont de faible importance en surface et volume, les produits et systèmes sont mis en œuvre manuellement. Dans le cas contraire la mise en œuvre est mécanisée.

> Rappel, avant toute réalisation de la réparation, une protection contre le vent, le soleil ou la pluie est à mettre en place en fonction des recommandations de la fiche technique du produit ou du système :

- abris ;
- bâches ;
- panneaux ;
- tissus non tissés humidifié en permanence (forte chaleur)…

3.6.4.2.1 Cas des applications manuelles

Avant la mise en place des produits et systèmes à base de liants hydrauliques modifiés ou non, pour humidifier la surface du béton, peuvent être utilisés :

- un pinceau ;
- une brosse ;
- une éponge ;
- un pulvérisateur ;
- un jet d'eau....

Photo n° 99 : humidification du substratum

> Si la mise en œuvre d'un gobetis d'accrochage est nécessaire, peuvent être utilisés :

- une truelle (projection),
- un pinceau ;
- une brosse ;
- un rouleau...

> Si, avant la mise en place des produits et systèmes à base de liants organiques, la surface doit être enduite d'un primaire d'accrochage (colle), peuvent être utilisés :

- un pinceau ;
- une brosse ;
- un rouleau ;
- un gant ;
- un peigne cranté…

La mise en place des produits et systèmes sous forme de mortiers est réalisée classiquement à **la truelle.** Pour le dressage des arêtes, **une règle** peut être utilisée. L'utilisation de coffrage peut renforcer l'efficacité de la réparation.

Photo n° 100 : exécution d'un ragréage (crédit photo Fosroc)

> Pour la finition des produits et systèmes à base de liants hydrauliques modifiés ou non, suivant l'aspect souhaité, peuvent être utilisés (cf. le GUIDE N°4 [FABEM]) :

- une taloche en plastique rigide ;
- une taloche éponge ;
- une taloche métallique ;
- un bloc de polystyrène ;
- une lisseuse en acier inoxydable…

> Pour la finition des produits et systèmes à base de liants organiques, il est préférable d'utiliser une lisseuse en acier inoxydable.

Sur les surfaces horizontales :

- pour la mise en œuvre de produits et systèmes autolissants, sont utilisés :
  - des plots pour matérialiser l'épaisseur à réaliser,
  - une raclette d'égalisation ou une truelle (dans les angles),
  - un rouleau débulleur et égalisateur ;
- pour la mise en œuvre de mortiers à consistance normale, sont utilisés :
  - une règle pout tirer le produit,
  - une taloche pour la finition.

Après la mise en place des produits et systèmes à base de liants hydrauliques, une protection contre le vent et le soleil est à mettre en place sous forme d'une cure :

- avec un produit de cure à mettre en œuvre au pulvérisateur ;
- des paillassons de feutre non tissé…maintenus humides ;
- des feuilles de polyane ou de PVC ;
- des bâches…

3.6.4.2.2 Cas des applications mécanisées

> Avant la mise en place des produits et systèmes à base de liants hydrauliques modifiés ou non, pour humidifier la surface du béton, peuvent être utilisés :

- un pulvérisateur ;
- un jet d'eau….

> Si la mise en œuvre d'un gobetis d'accrochage est nécessaire, peuvent être utilisés :

- une truelle (projection) ;
- un rouleau ;
- un pistolet à pot de projection ;
- une pompe à mortier…

> Si, avant la mise en place des produits et systèmes à base de liants organiques, la surface doit être enduite d'un primaire d'accrochage (colle), peuvent être utilisés :

- un rouleau ;
- un gant ;
- un peigne cranté…

> La mise en place des produits à base de liants hydrauliques se fait par projection (se reporter au GUIDE N°5 [FABEM]) :

- par la voie mouillée au moyen :
  - d'un pistolet à pot de projection ;
  - d'une pompe à mortier…
- par voie sèche au moyen :
  - d'une machine à projeter ;
  - d'une lance de projection…

Nota : *la projection par voie sèche est incompatible avec la mise en place d'un revêtement sur les armatures ou d'un gobetis d'accrochage sur le béton.*

Photo n° 101 : machine à projeter le béton en voie sèche (crédit photo D. Poineau)

Photo n° 102 : projection en cours

> Le réglage de l'épaisseur de la couche mise en place peut être obtenu au moyen :

- de coffrages matérialisant le coffrage de la pièce à restaurer ;
- d'une règle s'appuyant sur des guides…

> Après la mise en place des produits et systèmes à base de liants hydrauliques, une protection contre le vent et le soleil est à mettre en place sous forme d'une cure :

- avec un produit de cure à mettre en œuvre au pulvérisateur ;
- des paillassons de feutre non tissé…maintenus humides ;
- des feuilles de polyane ou de PVC ;
- des bâches…

3.6.4.3 Matériels de mise en œuvre de produits et systèmes de réparation des bétons appliqués en fortes épaisseurs

Lorsque les réparations sont localisées et de faible importance en surface et volume, les produits et systèmes sont mis en œuvre manuellement. Dans le cas contraire, la mise en œuvre est plus ou moins mécanisée. Normalement, seuls des produits et systèmes à base de liants hydrauliques prêts à l'emploi ou non sont utilisés.

> Rappel, avant toute réalisation de la réparation, une protection contre le vent, le soleil ou la pluie est à mettre en place en fonction des recommandations de la fiche technique du produit ou du système :

- abris ;
- bâches ;
- panneaux ;
- tissus non tissés humidifié en permanence (forte chaleur)…

3.6.4.3.1 Cas des applications manuelles

> Avant la mise en place des produits et systèmes à base de liants hydrauliques modifiés ou non, pour humidifier la surface du béton, peuvent être utilisés :

- un pulvérisateur ;
- un jet d'eau….

> Si, la mise en œuvre d'un gobetis d'accrochage est nécessaire, peuvent être utilisés :

- un pistolet à pot de projection ;
- une pompe à mortier…

> Si, avant la mise en place des produits et systèmes à base de liants organiques, la surface doit être enduite d'un primaire d'accrochage (colle), peuvent être utilisés :

- un rouleau ;
- une pompe pour produits bicomposants…

La mise en place des produits et systèmes sous forme de mortiers est réalisée classiquement à la truelle. Pour le dressage des arêtes, une règle peut être utilisée. L'utilisation de coffrage peut renforcer l'efficacité de la réparation.

> Pour la finition des produits et systèmes à base de liants hydrauliques modifiés ou non, suivant l'aspect souhaité, peuvent être utilisés (cf. le GUIDE N°4 [FABEM]) :

- une taloche en plastique rigide ;
- une taloche éponge ;
- une taloche métallique ;
- un bloc de polystyrène ;
- une lisseuse en acier inoxydable…

Pour la finition des produits et systèmes à base de liants de liants organiques, il est préférable d'utiliser **une lisseuse en acier inoxydable.**

> Sur les surfaces horizontales :

• pour la mise en œuvre de produits et systèmes autolissants, sont utilisés :

- des plots pour matérialiser l'épaisseur à réaliser,
- une raclette d'égalisation ou une truelle (dans les angles),
- un rouleau débulleur et égalisateur.

• pour la mise en œuvre de mortiers à consistance normale, sont utilisés :

- une règle pour tirer le produit,
- une taloche pour la finition.

> Après la mise en place des produits et systèmes à base de liants hydrauliques, une protection contre le vent et le soleil est à mettre en place sous forme d'une cure :

- avec un produit de cure à mettre en œuvre au pulvérisateur ;
- des paillassons de feutre non tissé…maintenus humides ;
- des feuilles de polyane ou de PVC ;
- des bâches…

3.6.4.3.2 Cas des applications mécanisées

> Avant la mise en place des produits et systèmes à base de liants hydrauliques modifiés ou non, pour humidifier la surface du béton, peuvent être utilisés :

- un pulvérisateur ;
- un jet d'eau….

> Si la mise en œuvre d'un gobetis d'accrochage est nécessaire, peuvent être utilisés :

- un pistolet à pot de projection ;
- une pompe à mortier…

> La mise en place des produits et systèmes sous forme de micro-bétons ou de bétons peut être réalisée au moyen de plusieurs techniques :

- **par bétonnage classique** dans des coffrages (se reporter au **DTU 21 et au Fascicule 65A),** ce qui impose :

  - des vibrateurs sauf pour des bétons de type BAP ;
  - des règles pour dresser les surfaces…

■ **par injection (coulis, mortiers ou micro-bétons) dans des coffrages étanches.** L'injection peut se faire :

- soit par simple gravité au moyen d'une pompe à mortier ou béton,
- soit sous pression au moyen d'une presse d'injection adaptée à la granulométrie du produit ;

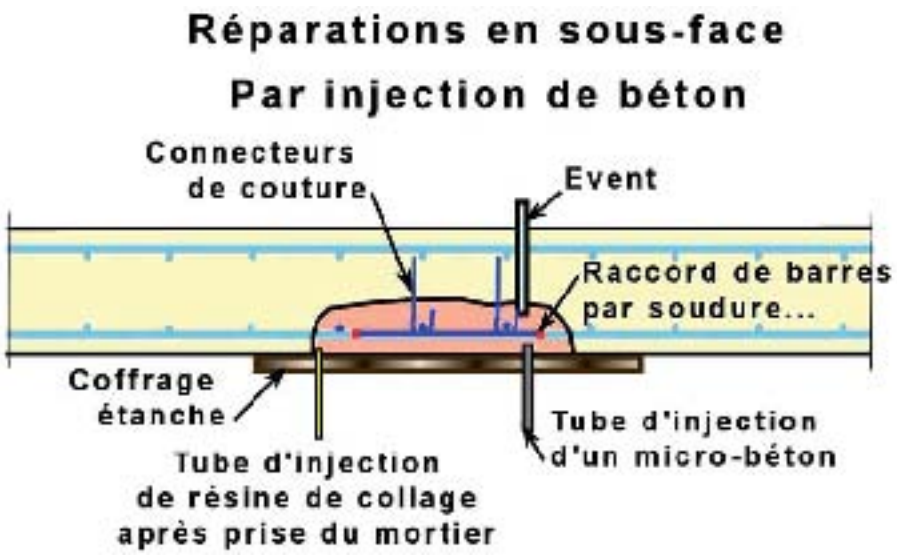


Figure n° 30 : principe d'une injection sous pression d'un mortier ou d'un micro-béton

■ **par projection** (se reporter au **GUIDE N°5 [FABEM]) :**

• par voie mouillée au moyen :

- d'un pistolet à pot de projection,
- d'une pompe à mortier...

• par voie sèche au moyen :

- d'une machine à projeter ;
- d'une lance de projection...

Nota : *la projection par voie sèche est incompatible avec la mise en place d'un revêtement sur les armatures ou d'un gobetis d'accrochage sur le béton.*

> Le réglage de l'épaisseur de la couche mise en place peut être obtenu au moyen :

Photo n° 103 : planches matérialisant le coffrage d'une poutre (crédit photo D. Poineau)

- de planches de coffrage matérialisant le coffrage de la pièce à restaurer ;
- d'une règle s'appuyant sur des guides…

> Après la mise en place des produits et systèmes à base de liants hydrauliques, une protection contre le vent et le soleil est à mettre en place sous forme d'une cure :

- avec un produit de cure à mettre en œuvre au pulvérisateur ;
- des paillassons de feutre non tissé…maintenus humides ;
- des feuilles de polyane ou de PVC ;
- des bâches…

Une injection de l'interface entre le mortier ou le béton ajouté et le béton de la structure peut être nécessaire (voir l'article 3.6.4.5 ci-dessous).

Photo n° 104 : évents pour l'injection de la surface de reprise (crédit photo D. Poineau)

3.6.4.4 Matériels de mise en œuvre de produits et systèmes de collage structural des bétons

Le choix de l'outillage est fonction de l'importance des surfaces à encoller ; il faut terminer l'encollage avant que la colle ne fasse prise (DPU) d'autant que le double encollage est souvent nécessaire.

3.6.4.4.1 Cas de collages béton durci sur béton durci

Ce type de collage concerne aussi l'encollage des tôles, des tissus et plaques de composites utilisés pour le renforcement des structures.

> La mise en place de la colle se fait :

■ dans cas d'un produit d'encollage à viscosité élevée, avec :

- une taloche métallique,
- un peigne cranté (ce qui assure une répartition uniforme du produit),
- un gant (ce qui permet de frotter pour bien appliquer la colle sur toute la surface) ;

- dans le cas d'un produit d'encollage moins visqueux, avec :

  - un rouleau,

  - une brosse (petites surfaces).

La mise en pression du film de colle, souvent indispensable, est obtenue au moyen **de vessies gonflables, de vérins...**

Rappel, les renforts par tôles et composites collés font l'objet du GUIDE N°7 [FABEM].

3.6.4.4.2 Cas de collages béton frais sur béton durci

Ce type de collage concerne la technique du béton contrecollé utilisé pour le renforcement ou l'élargissement des dalles de couverture, l'amélioration de l'adhérence entre le béton durci et le béton frais d'un ragréage, le remplissage d'une encoche destinée à la mise en place d'une armature de renfort...

> Le produit de collage peut être mis en place avec :

- un pistolet relié à une pompe pour produits bicomposants (Cf. le **GUIDE N°3 [FABEM]**),
- un rouleau,
- une brosse
- un pinceau...

Le choix du matériel de mise en place est souvent conditionné par **un essai de convenance,** car la présence des armatures de béton armé de couture entre les deux bétons rend difficile la mise en place du produit de collage.

Dans les deux cas, il faut également prévoir **des bâches en polyane** pour empêcher la colle de baver sur les surfaces non concernées et des produits (dichlorométhane [produit nocif]...) pour le nettoyage des outils avant la polymérisation de la colle.

3.6.4.5 Matériels pour l'injection de produits et systèmes dans l'interface entre le produit de réparation et le béton support

Après une réparation ou un renforcement par la mise en œuvre de béton en sous-face d'une structure, il est souhaitable d'injecter l'interface entre le béton de la structure et le béton ajouté.

> Pour réaliser cette injection qui concerne la totalité de l'interface, il faut disposer avant le bétonnage :

- des joints hydrogonflants (dispositifs brevetés) si la reprise est longiligne et soumise à une pression d'eau ;
- des évents reliés par des flexibles d'injection ;

Après le coulage d'un massif de béton au contact et lié au béton durci d'une structure, il est conseillé d'injecter **la fissure de retrait** qui se forme à l'interface des deux bétons. Pour réaliser cette opération, qui concerne le périmètre de la reprise de bétonnage, il faut mettre en place après le décoffrage du massif des injecteurs tout le long de la reprise.

Les matériels nécessaires pour effectuer de telles injections sont décrits dans le **GUIDE N°3 FABEM].**

3.6.4.6 Matériels pour l'injection ou le remplissage de produits et systèmes dans des fissures ou des vides du béton

L'injection des fissures, des vides du béton, des nids de cailloux… d'une structure est parfois nécessaire pour renforcer la structure ou pour réduire les risques de pénétration des agents agressifs.

Les matériels nécessaires pour effectuer de telles injections sont décrits dans le **GUIDE N°3 [FABEM].**

3.6.4.7 Matériels de mise en œuvre de produits et systèmes de scellement des armatures de béton armé

Les produits et systèmes de scellement des armatures sont, soit à base de liants organiques, soit à base de liants hydrauliques (retrait compensé). Souvent ces produits sont aussi utilisés pour la réalisation de calages.

> Les trous dans le béton sont effectués :

- cas des trous de diamètre < 25 mm :
  - avec un perforateur équipé d'une mèche de forage ;
- cas des trous > 25mm :
  - avec une perceuse équipée d'une couronne de forage au diamant (attention, la surface du trou ne doit pas être trop lisse).

> Le nettoyage soigné des trous est effectué avec :

- un écouvillon ;
- un jet d'air comprimé (déshuilé)…

> Le produit de scellement doit remplir complètement le trou :

- cas d'un scellement vertical sur une paroi horizontale ou faiblement inclinée, le produit sous forme d'un coulis est mis en place par simple gravité :
  - avec un seau et un entonnoir…

- cas d'un scellement sur une paroi verticale ou une sous-face, le produit sous forme **d'un mortier à consistance ferme** est mis en place manuellement avec une truelle et serré dans le trou :

  - avec un matoir (tige en métal ou en bois de diamètre adapté),

  - avec un pistolet manuel ou pneumatique prévu pour cet usage…

Photo n° 105 : remplissage des trous avant scellement de barres

Photo n° 106 : scellement d'armatures de béton armé (crédit photo D. Poineau)

Certains industriels proposent **des coffrets de scellement pour armatures de béton armé** comprenant des outils de nettoyage des trous (écouvillons, buses de nettoyage), des pistolets d'injections manuels ou pneumatiques équipés de flexibles, buses d'injection, ainsi que des cartouches contenant le produit de scellement.

A ceci, il faut ajouter **les dispositifs qui maintiennent l'armature en place** pendant le durcissement du produit de scellement.

> Il est parfois nécessaire de disposer :

- du matériel de mise en place **de manchons de jonction** pour allonger des barres de béton armé trop courtes (Cf. les normes **NF A 35-020-1 et NF A 35 020-2** ainsi que **la Marque AFCAB-Dispositifs de raboutage ou d'ancrage d'armature) ;**
- **du matériel de soudage** pour allonger des barres de béton armé, les soudures à exécuter étant de type bout à bout ou sur éclisses (Cf. **le fascicule 65A** et le fascicule de documentation **FD A 35-029).**

Photo n° 107 : manchon de jonction (crédit photo D. Poineau)

3.6.4.8 Matériels de mise en œuvre de produits et systèmes de calage d'éléments

Les produits et systèmes de calage sont, soit à base de liants organiques, soit à base de liants hydrauliques à retrait compensé. Ils peuvent se présenter sous la forme d'un coulis, d'un mortier, voire d'un micro-béton (coulis ou mortier auquel sont ajoutés des granulats de granulométrie adaptée).

> Pour les produits de calage à base de liants organiques (résines époxydiques), la mise en place d'un primaire d'accrochage étant nécessaire, peuvent être utilisés :

- un pinceau ;
- une brosse ;
- un rouleau….

> Les mortiers et les micro-bétons de consistance ferme sont classiquement mis en œuvre par coulés dans des coffrages. Leur mise en place peut nécessiter

- des vibrateurs (lorsque le volume à couler est important).

Ils sont arasés et lissés avec :

- une règle ;
- une truelle ; une taloche…

> Les coulis et les mortiers de consistance fluide peuvent être coulés dans des coffrages ; ils peuvent aussi être injectés au moyen :

- d'une pompe adaptée à la granulométrie du produit ;
- d'une pompe ou d'un pot à pression dans un coffrage adapté munis d'évents et rempli de granulats pour constituer un micro-béton.

Il est aussi possible de mettre en œuvre un mortier sec au moyen **d'un matoir.** Cette technique n'est plus guère utilisée. Elle nécessite un exécutant ayant une grande expérience.

3.6.4.9 Matériels de mise en œuvre d'armatures passives additionnelles internes au béton

Ces armatures de béton armé peuvent être disposées traditionnellement sous forme de barres isolées, de treillis ou de cages d'armatures. Parfois, en sus, elles doivent être scellées dans le béton de la structure (se reporter à l'article 3.6.4.7 ci-dessus).

Les armatures de béton armé en acier normal ou galvanisé sont façonnées, assemblées (manchons, soudage) et mises en place avec les techniques et matériels traditionnels (se reporter au **DTU 21** et **au fascicule 65A).**

Les armatures en acier inoxydables sont façonnées, assemblées et mises en place avec des matériels spécifiques. De plus, il faut éviter les couples bimétalliques avec les autres armatures en acier normal (se reporter à **l'annexe n°3** du présent guide).

Les armatures en composites sont obligatoirement façonnées en l'atelier du fabricant ; elles sont assemblées et mises en place en utilisant le matériel prescrit par le fabricant.

3.6.4.10 Matériels de mise en œuvre par collage d'armatures passives extérieures au béton

Les tôles métalliques ainsi que les tissus et les plaques en composites à coller à la surface du béton sont façonnées, assemblés et mis en place avec les matériels visés dans le **GUIDE N°7 [FABEM].**

3.6.4.11 Matériels d'ajout de forces par précontrainte additionnelle

La mise en place d'une précontrainte additionnelle complète parfois les autres techniques lors de la réparation ou le renforcement d'une structure en béton armé ou précontraint. La conception, la réalisation d'une telle opération, ainsi que **les matériels spécifiques d'exécution** sont l'objet **du GUIDE N°8 [FABEM].**

3.6.4.12 Matériels d'ajout de forces par déformations imposées

La conception, la réalisation d'une telle opération, ainsi que les matériels spécifiques d'exécution, sont l'objet du **GUIDE N°8 [FABEM].**

3.6.4.13 Matériels de remplacement du béton carbonaté et/ou pollué ou d'augmentation du recouvrement des armatures pour apporter des alcalins et/ou augmenter la résistivité du béton

Le matériel de **remplacement du béton pollué et/ou carbonaté** est visé par les articles 3.6.4.2 et 3.6.4.3 ci-dessus.

Celui nécessaire à la réalisation **de recouvrements** est visé par l'article 3.6.4.2 ci-dessus.

3.6.4.14 Matériels de mise en œuvre des traitements électrochimiques

Le lancement d'une consultation pour la mise en œuvre de tels procédés doit être précédé **d'une étude par un spécialiste** afin de juger de la faisabilité d'une telle opération. Cette étude permet d'avoir une idée du matériel nécessaire et des quantités à mettre en œuvre. **Le marché** fixe **la liste** et les caractéristiques des matériels et des instruments de mesure… indispensables pour une telle opération.

3.6.4.14.1 Cas de la déminéralisation et de la ré-alcalinisation

Les procédés de déminéralisation et de ré-alcalinisation sont brevetés. Les matériels à mettre en œuvre en conformité avec la liste ci-dessus sont proposés par l'entrepreneur à l'acceptation du maître d'œuvre.

Le fascicule de documentation FD CEN/TS 14038-1 (sur la ré-alcalinisation) détaille la liste des matériels nécessaires et leur rôle. Le résumé ci-après permet d'avoir une idée des matériels qui doivent être disponibles sur le chantier, aussi bien pour une **déminéralisation que pour une ré-alcalinisation à courant imposé.** Les méthodes utilisant une anode sacrificielle ne nécessitent pas le recours à une alimentation électrique.

Rappel, le procédé n'est pas applicable aux structures précontraintes, aux armatures de béton armé galvanisées ou revêtues d'un revêtement étanche et si la corrosion est due à la présence de chlorures (il faut avoir recours à une déchloruration).

> Sont à prévoir :

- **les appareils de mesure** permettant de connaître : la position et l'enrobage des armatures ainsi que leur continuité électrique, la profondeur de carbonatation, le courbe pénétration/dosage des chlorures ;
- **les dispositifs nécessaires à l'étude des risques éventuels d'alcali-réaction** (à cause de l'ajout d'alcalins par le traitement) ;
- **l'anode,** souvent en titane activé, qui permet le passage et la répartition du courant sur toute la surface à traiter ;
- **la solution électrolytique alcaline et son support** (cellulose sous forme de pâte à papier), qui permet le passage du courant et apporte les alcalins au béton (ré-alcalinisation). Le revêtement de cellulose doit avoir une humidité sensiblement constante, ce qui impose une protection contre les intempéries (vent, pluie et soleil) ;
- **des câbles isolés de couleur rouge** lorsqu'ils sont reliés à l'anode et **de couleur noire** lorsqu'ils sont reliés aux armatures formant cathode ;
- **une alimentation électrique** fournissant un courant continu stable en voltage (50 V) et ampérage et une puissance suffisante. Le système doit être munis des disjoncteurs et fusibles nécessaires en cas de court-circuit (avec alarme) ;
- **des appareils pour mesurer la continuité électrique des armatures et des circuits,** le voltage et l'ampérage développés et la durée du traitement.

Photo n° 108 : opération de déminéralisation-ré-alcalinisation sur une poutre d'un immeuble (crédit photo Freyssinet)

3.6.4.14.2 Cas de la prévention et de la protection cathodique

La norme NF EN 12696 détaille la liste des matériels nécessaires et leurs rôles. Le résumé ci-après permet d'avoir une idée des matériels qui doivent être disponibles sur le chantier dans le cas d'**une protection cathodique à courant imposé.** Ce matériel est destiné à fonctionner **pendant de très nombreuses années** contrairement aux dispositifs utilisés dans les traitements de déminéralisation et de ré-alcalinisation.

> Sont à prévoir :

- **les appareils de mesure** permettant de connaître : la présence de désordres (délaminations…), la position et l'enrobage des armatures ainsi que leur continuité électrique, la profondeur de carbonatation, le courbe pénétration/dosage des chlorures mais aussi la résistivité du béton et le potentiel d'électrode acier/béton ;
- **les dispositifs** nécessaires à l'étude des risques éventuels d'alcali-réaction (normalement il est précisé que la protection cathodique ne déclenche pas un tel phénomène, mais il peut exister) ;
- **l'anode,** normalement en titane activé, qui permet le passage et la répartition du courant sur toute la surface à traiter **et son enrobage de protection** (mortier ou micro-béton à base de liants hydraulique adhérant au support avec une résistivité proche de celle du béton de la structure) ;
- **des capteurs de surveillance** nécessaires pendant toute la durée du traitement : électrodes de référence portatives (mesure du potentiel d'électrode acier/béton), sondes dépolarisantes, éprouvettes et sondes macro-piles… et **une centrale de recueil des données ;**
- **des câbles isolés de couleur rouge** lorsqu'ils sont reliés à l'anode et **de couleur noire** lorsqu'ils sont reliés aux armatures formant cathode, **des câbles gris** pour les câbles d'essais de surveillance, **des câbles bleu** pour les électrodes de référence, **des câbles jaunes** pour les autres capteurs de référence et enfin **des boîtiers de jonction ;**
- **une alimentation électrique** fournissant un courant continu stable en voltage (50 V) et ampérage et une puissance suffisante. Le système doit être muni des disjoncteurs et fusibles nécessaires en cas de court-circuit (avec alarme).

3.6.4.15 Matériels de mise en œuvre d'un revêtement actif ou non sur des armatures de béton armé

Afin de restaurer la passivité des armatures ou de les protéger contre la corrosion, des produits et systèmes peuvent être utilisés sous forme de revêtements actifs ou non[53].

> Sur les armatures existantes dégagées du béton et débarrassées de la rouille, ces produits sont mis en place avec :

- une brosse ;
- un pinceau.

[53] Les produits à base de liants hydrauliques, tels que les mortiers et bétons, peuvent aussi assurer la passivité des armatures sans nécessiter la mise en place de produits spécifiques, tels que les inhibiteurs de corrosion, à la surface des armatures.

> Sur des barres additionnelles ou des cages d'armatures ajoutées, les produits peuvent être appliqués par des processus industriels :

- galvanisation des armatures ;
- revêtements à base de résines époxydiques…

3.6.4.16 Matériels de mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion sur bétons

> Les inhibiteurs de corrosion sont mis en œuvre conformément aux fiches techniques des fabricants au moyen :

- d'une brosse ;
- d'un rouleau ;
- d'un pulvérisateur basse pression.

Il convient également de se reporter au **GUIDE N°4 [FABEM].**

3.6.4.17 Matériels de réinjection de conduits de précontrainte

La conception, la réalisation d'une telle opération, ainsi que **les matériels spécifiques d'exécution** font l'objet du **GUIDE N°8 [FABEM].**

4 Modes opératoires

4.1 Généralités
4.2 Préparation du support et des armatures
4.3 Préparation et réalisation de l'opération

> Rappel : les 38 méthodes de réparations visées dans l'introduction et qui se réduisent à 16 sont classées, soit dans LE GROUPE 1, soit dans LE GROUPE 2. Se reporter à l'introduction.

La réparation ou le renforcement d'une structure dont le béton est dégradé impose le respect **des exigences générales** listées ci-dessous. La majeure partie de ces exigences est extraite des normes **NF EN 1504-10 et NF P 95-101 et figure dans l'article 3.2.6 ci-dessus consacré au projet de réparation :**

- l'état de la structure sur les plans chimique, électrochimique et physique doit être connu, les causes des désordres doivent être identifiées, les méthodes de réparation ou de renforcement doivent être fixées ; enfin, les contraintes d'accès aux ouvrages, leurs étaiements provisoires éventuels et les contraintes de mise en œuvre des matériaux doivent être définies par l'étude préalable. En outre, **l'entrepreneur** doit mettre en place **les moyens nécessaires** pour assurer de façon efficace l'exécution des travaux ;

- **l'entrepreneur** doit prendre en compte **les contraintes** que lui impose **le marché** concernant les emprises de chantier et la protection contre toute nuisance, pollution ou contamination, tant des parties de l'ouvrage laissées en l'état, que des tiers et d'autres ouvrages. **Le marché** peut aussi, si cela est compatible avec les travaux prévus, imposer le maintien de l'ouvrage en exploitation pendant tout ou partie des travaux avec les conséquences qui en résultent, d'une part sur le plan de la sécurité des tiers et du personnel et, d'autre part sur l'exécution des travaux (vibrations, déformations....) ;

- avant la mise en œuvre des produits et systèmes, **l'entrepreneur** doit obtenir **l'état du support requis** (propreté, résistance, adhérence...) ;

- l'importance et le phasage des travaux de démolition ainsi que leurs incidences sur **la stabilité de la structure** doivent être prises en compte et donc faire l'objet d'une étude et, si besoin est, de calculs. **Une procédure d'exécution,** à porter à la connaissance de tous les intervenants, doit être tirée de cette étude avec la consigne impérative de saisir le chargé d'étude si les travaux ne peuvent être exécutés suivant la procédure prévue (modification de l'ordre des démolitions, volume de démolition à augmenter, ferraillage en place différent de celui des plans dits d'exécution...), voire dans le cas où il serait impossible de respecter la procédure. En effet, la reprise du béton dégradé nécessite, le plus souvent, l'élimination du béton pollué et le dégagement des armatures corrodées. Ces opérations, si **elles concernent des surfaces et volumes importants, peuvent mettre en péril la stabilité de la structure** (matériel de démolition inadapté, réduction drastique des sections résistantes, suppression de contreventements, absence d'étaiement provisoire...) ;

- **en cas de renforcement, le béton et les armatures ajoutés doivent participer à la reprise des efforts appliqués à la structure.** Cette participation, suivant les exigences du marché et des études effectuées, concerne, soit uniquement la reprise des charges d'exploitation, soit à la fois la reprise des charges permanentes et des charges d'exploitation. Il peut en résulter la mise sur cintre de la structure, des opérations de vérinage... ;

- **les contraintes environnementales** qui règnent au moment des travaux doivent être prises en compte par **l'entrepreneur** afin d'obtenir les conditions requises (température, hygrométrie, vitesse du vent...) pour l'application des produits et systèmes. Si besoin est, **des protections temporaires** sont à mettre en place.

Il est rappelé que, le plus souvent, les travaux doivent satisfaire à la fois à **plusieurs fonctions ou «principes»** (terme utilisé dans les normes de la série **NF EN 1504-* ***), ce qui oblige à mettre en œuvre **plusieurs méthodes en même temps.** Par exemple, le remplacement du béton pollué est le plus souvent combiné à la mise en place d'un revêtement inhibiteur sur les armatures, à l'ajout d'armatures, au traitement des fissures, à l'application d'un revêtement de protection.

> Il est possible de considérer que la majeure partie des différentes méthodes de réparation et de renforcement, ainsi que celles de préservation ou de restauration de la passivité des armatures du présent guide comportent normalement[54] les trois phases principales suivantes :

- **la préparation du support en béton et, si nécessaire, des armatures ;**
- **la préparation de l'opération ;**
- **la conduite de l'opération.**

Ces différentes phases sont détaillées dans les articles 5.3 et 6 de la norme homologuée **NF P 95-101** relative à la reprise **du béton dégradé superficiellement.** On retrouve quasiment les mêmes phases dans la norme **NF EN 1504-10**, voire dans les **DTU** et **le fascicule 65A.** Chaque phase peut comporter plusieurs opérations unitaires.

L'ensemble des opérations liées aux trois phases est effectué conformément aux dispositions **de la procédure correspondant aux travaux à exécuter,** qui reprend les exigences **du marché,** des normes associées, de la notice d'emploi (fiche technique) du produit et des règles de l'art **(fascicules du CCTG, DTU...). Le document de suivi correspondant aux travaux à exécuter** est complété au fur et à mesure du déroulement des travaux.

[54] Par exemple, l'ajout de forces par une précontrainte additionnelle ou des déformations imposées comprend plusieurs séries d'opérations successives. De telles opérations comportent donc davantage de phases qu'un ajout de béton.

4.2.1 GÉNÉRALITÉS

4.2.1.1 Le relevé des défauts du support en béton et des armatures

L'article 3.2 du **GUIDE N°4 [FABEM]** consacré à la protection des bétons donne **une liste exhaustive des différents défauts** que peut présenter un support en béton (voir également les guides 2 et 3). L'article 3.2.3 du présent **GUIDE N°1 [FABEM]** donne les différentes causes et explique les mécanismes de dégradation du béton et des armatures. **Il est donc inutile de répéter toutes ces informations dans le présent article.**

Quelle que soit la méthode de réparation et/ou de renforcement ou de préservation et/ou de restauration de la passivité des armatures visée dans le présent guide, **le marché** impose sur le chantier **un relevé contradictoire de l'état du support et sa consistance, même si un relevé des défauts** doit normalement déjà figurer dans **les pièces du marché. Ce relevé contradictoire de l'état du support** permet, en marquant et en métrant les défauts du béton, les fissures, l'état des armatures… **de contrôler le relevé du marché** et de fixer définitivement, après **l'épreuve de convenance,** les techniques de préparation du support à mettre en œuvre.

Si le diagnostic et l'expertise préalable visés à l'article 3.2.5 ci-dessus n'ont pu avoir lieu, **le marché** doit fixer **la consistance des investigations et études** à entreprendre avant tout travaux. Dans un tel cas, il est conseillé de mettre **le diagnostic en tranche ferme et les travaux en tranche conditionnelle,** compte tenu des incertitudes sur les méthodes à appliquer et les quantités à mettre en œuvre.

Les travaux de réparation ou de renforcement d'un ouvrage précontraint nécessitent des précautions particulières pour ne pas mettre en jeu la sécurité de la structure, tout particulièrement lors du repiquage et de l'enlèvement du béton (réduction de la section résistante mais conservation de la force de précontrainte).

4.2.1.2 Préparation du support béton et des armatures et qualité du support à obtenir

4.2.1.2.1 Généralités

> Le marché doit définir la qualité que doit présenter le support :

1. **avant la mise en œuvre,** soit de la méthode de réparation du béton et/ou de renforcement structural, soit de la méthode de préservation et/ou de restauration de la passivité des armatures :

Les exigences correspondantes sont détaillées pour chaque méthode dans la suite de cet article avec, si nécessaire, un renvoi vers un des guides du **STRRES de la famille [FABEM].**

Cependant, si la préparation du support concerne **une reprise de bétonnage** (par exemple, cas de la mise en place d'un produit ou systèmes en forte épaisseur par bétonnage), il suffit d'appliquer **les textes de références :**

- **le DTU 21** (article 5.3) ;
- **le fascicule 65A** (article 74) ;
- **les recommandations professionnelles de 2000** pour l'exécution des reprises de bétonnage mises au point par le **CEBTP, la FFB et le SETRA** (recommandations visées par le **DTU 21** et **le fascicule 65A).**

2. mais aussi, après la réalisation, soit de la méthode de réparation du béton et/ou de renforcement structural, soit de la méthode de préservation et/ou de restauration de la passivité, par exemple, pour :

- satisfaire à des tolérances géométriques et/ou à des exigences d'aspect ;
- permettre l'exécution d'autres opérations :
  - une injection de fissures ou de vides du béton,
  - un remplissage ou un pontage des fissures existantes
  - un traitement de surface (imprégnation, revêtement de protection…),

Les tolérances géométriques et les exigences d'aspect du gros œuvre sont données par les textes de référence que sont le DTU 21 et le fascicule 65A.

- **dans le domaine du bâtiment, le DTU 21** fixe dans son article 7 les tolérances :
  - des poteaux et des murs,
  - des sections,
  - des parements (élémentaires, ordinaires, courants et soignés),
  - des dalles et planchers.

Pour la texture et la teinte, **les documents particuliers du marché (DPM)** doivent faire référence au fascicule de documentation **FD P 18-503.**

- dans le domaine du génie civil, le fascicule 65A fixe dans son chapitre :
  - n°5 les tolérances sur les parements et autres surfaces coffrées, ainsi que les exigences sur la texture et la teinte, en s'appuyant sur le **FD P 18-503,**
  - n°6 les tolérances sur la position des armatures de béton armé,
  - n°9 les tolérances sur la position des armatures de précontrainte,
  - n°10 les tolérances sur l'ouvrage fini,

> Lorsqu'il est nécessaire de réaliser d'autres travaux après une réparation et/ou un renforcement ou une préservation et/ou une restauration de la passivité, pour la préparation du support, il peut être fait appel :

- **au GUIDE N°2 [FABEM] et au GUIDE N°3 [FABEM]** pour une injection des fissures ou des vides du béton, un colmatage ou un remplissage ou un pontage des fissures existantes, soit dans le cadre d'un renforcement structural, soit dans celui d'une protection contre la pénétration d'agents agressifs ;

- **au GUIDE N°4 [FABEM]** pour la réalisation par une imprégnation hydrophobe ou non, un revêtement… **d'une protection supplémentaire,** soit contre la pénétration d'agents agressifs et/ou de l'humidité, soit pour améliorer la résistance physique et/ou chimique, voire pour augmenter la résistivité et/ou assurer un contrôle cathodique ;

- **à d'autres DTU ou d'autres fascicules du CCTG** pour certains travaux.

Le marché demande à **l'entrepreneur** de proposer à l'acceptation **du maître d'œuvre la procédure et le cadre du document de suivi relatifs à la préparation du support en béton et des armatures. Les techniques, le personnel ainsi que les moyens et produits à mettre en œuvre** seront ensuite validés par **l'épreuve de convenance** correspondante.

Cette procédure est intégrée dans **la procédure relative à l'ensemble des travaux à effectuer** (préparation du support, préparation des produits, mise en œuvre des produits, contrôles…) et ce cadre de document de suivi est intégré dans **le cadre du document de suivi de l'ensemble des travaux.**

Avant de mettre en œuvre **une méthode de réparation du groupe 1** (ces méthodes sont listées dans l'introduction [par exemple, la mise en œuvre d'un revêtement]), il est le plus souvent nécessaire, **dans une première phase, de réparer, au moins localement, le béton dégradé** (très souvent à cause de la corrosion). Il faut donc mettre en œuvre **les techniques de préparation du support béton et des armatures** utilisées pour **les réparations du groupe 2,** à savoir : repiquage, sablage, bouchardage, décapage, nettoyage, lavage…

Afin de ne pas surcharger le présent guide, seules sont développées les techniques de préparation du support béton et des armatures relatives **aux méthodes de réparation du groupe 2.** Pour celles **du groupe 1,** les techniques sont simplement rappelées car elles sont détaillées dans les **autres guides du STRRES).**

> La préparation du support béton et des armatures comprend :

- **la préparation du support béton, comprenant trois opérations :**

  - le nettoyage (élimination de la poussière des matériaux décollés, des agents contaminants…),

  - le repiquage du béton (sur une profondeur ≤ 15 mm),

  - l'enlèvement du béton (sur une profondeur > 15 mm) ;

- **la préparation des armatures en place dégagées ;**
- **le nettoyage des surfaces après préparation du support et des armatures ;**
- **les exigences particulières liées à la nature des produits de réparation.**

Seule parmi les normes de l'ensemble de la série, la norme harmonisée **NF EN 1504-10** traite dans sa partie normative et dans son annexe A informative **des techniques de préparation** du support béton et des armatures et **des exigences à satisfaire rappelées ci-après :**

- **partie normative :**
  - le tableau 2 indique, sans les développer, les techniques de préparation,
  - le tableau 4 indique, sans les développer, les contrôles de la qualité,
  - l'article 7 détaille essentiellement les facteurs à prendre en compte lors de l'opération pour obtenir un résultat satisfaisant ;
- **annexe A informative :**
  - l'article A7 traite dans le détail des différentes techniques,
  - l'article A9 et le tableau A2 détaillent les contrôles de la qualité à effectuer avec certains niveaux de performance à obtenir.

La norme homologuée NF P 95-101 (Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Reprise du béton dégradé superficiellement) donne dans son article 5.3 et dans **le tableau n°1** les différentes méthodes permettant :

- d'une part, d'éliminer le béton dégradé en épaisseur et/ou en surface (les méthodes utilisables sont décrites avec leurs avantages et inconvénients) ;
- d'autre part, de préparer les armatures.

Il convient de noter que **les exigences de résultat des deux normes ne sont quasiment pas chiffrées** sur la qualité **du support béton** à obtenir. Pour **les armatures,** les deux normes visent surtout **le contrôle visuel** (absence de traces de corrosion), qui suffit dans la plupart des cas ; elles prévoient cependant **la mesure du degré de décapage** si besoin est.

Il est donc indispensable, outre **les contrôles visuels,** de vérifier **l'efficacité de la préparation du support béton** lors de **l'épreuve de convenance** par des essais de contrôle sur le produit ou le système, une fois appliqué et durci sur les surfaces de référence (essai de traction directe, carottage… in situ). Les différents essais sont listés dans les normes de la série 1504-** et en particulier dans la norme **NF EN 1504-10.**

En effet, si les résultats de **l'épreuve de convenance** après application du produit ou du système sont satisfaisants, comme on connaît **l'état des surfaces de référence,** tant sur le plan visuel que sur le plan des performances (essai de traction directe) avant toute application des produits et systèmes, on dispose des informations qui permettent de contrôler la qualité de la préparation du support du béton dans son ensemble.

4.2.1.2.2 Préparation du support béton – Élimination du béton dégradé – Exigences de résultats

L'entrepreneur doit définir **les techniques** qu'il compte utiliser pour éliminer le béton dégradé ainsi que le matériel nécessaire, les dispositifs de protection et les moyens de contrôle prévus, ainsi que les conditions de recyclage des produits utilisés (par exemple, en cas de sablage ou lorsqu'un décapage chimique est prévu). Les lieux de stockage ou d'évacuation des gravois doivent être précisés.

Les différentes méthodes d'élimination des bétons dégradés, de préparation des surfaces et de nettoyage sont indiquées dans le tableau suivant.

ATTENTION, la préparation d'un support avec enlèvement du béton nécessite, en général, le recours à au moins deux techniques de préparation. Une première de dégrossissage relativement agressive et une autre de finition. Un nettoyage complémentaire est normalement nécessaire.

Méthodes - Matériel	Efficacité	Inconvénients
Enlèvement du béton : élimination en épaisseur (> 15 mm)		
Burinage Outils manuels pneumatiques ou électriques légers	Bon dégagement des bétons fissurés, brûlés et pollués dans l'encombrement des armatures.	Création de microfissurations locales dans le cas d'abattage sans précaution. Déformation et blessures des armatures passives et actives. Marteaux piqueurs traumatisants pour le personnel
Repiquage Marteau léger pneumatique à aiguilles multiples	Préparation efficace des bétons et surtout des armatures corrodées.	Création de microfissurations dans les granulats du béton.
Bouchardage Outils manuels, pneumatiques ou électriques légers à pointes de diamant	Bonne préparation des surfaces de faible importance.	Microfissurations importantes.
Décapage à l'eau à très haute pression Jusqu'à 110 MPa (> 2 fois la résistance en compression du béton)	Bon enlèvement des granulats dessertis et des liants dégradés. Sauvegarde des armatures et décapage efficace des armatures (augmenter la pression > 150 MPa).	Risques pour le personnel et les tiers (prévoir des protections contre les projections). Bruit intense. Eaux polluée à recycler.
Repiquage du béton : élimination de surface (sensiblement jusqu'à 15 mm)		
Sablage à sec Sableuse pneumatique et compresseur (pression 6 à 7 bars)	Avec sables synthétiques agréés, bonne préparation des bétons et armatures. Bonne préparation des reprises avec des produits à base de liants organiques (surface de reprise sèche).	Nuages de poussière polluant. Nécessité d'un personnel qualifié avec EPI. Risques pour le personnel. Sur les bétons peu compacts, le repiquage peut devenir trop agressif.
Sablage humide Sableuse pneumatique et compresseur	Avec de la silice pure, bonne préparation des reprises avec des produits à base de liants hydrauliques (surface de reprise humide).	Risque important de pollution des parties voisines. Prévoir une protection efficace.
Décapage à l'eau à moyenne pression < 60 MPa	Bon enlèvement des granulats dessertis et des liants dégradés.	Risques pour le personnel et les tiers (prévoir des protections h > 2,50 m). Eaux polluées à recycler.
Rabotage mécanique Robot électrique à molettes ou outils multiples	Préparation des surfaces planes horizontales, non armées, fissurées et polluées.	Création d'amorces de fissuration. Prévoir un produit de collage ou un primaire d'accrochage.
Décapage thermique Lance à becs multiples oxyacétyléniques	Préparation des surfaces planes de béton non armé, très efficace en cas de pollution chimique. Efficace pour l'enlèvement de revêtements polymères en combinaison avec un raclage.	Création de fissures dans les granulats du béton. Prévoir un nettoyage final énergique.
Ponçage Ponceuse légère, rotative, à disques abrasifs	Préparation des surfaces planes de faible importance sans fissure ni armature	Pas de reprise performante, risque de polissage de la surface.

Décapage chimique		
Par acide dilué ou solvant	A réserver aux cas particuliers : élimination de revêtements polymères (avec raclage), de contaminants ayant pénétré dans le béton, de la laitance, de béton non armé, de la rouille des armatures…	Risque important de pollution des parties voisines et risques de corrosion. Prévoir une protection efficace et, après traitement, l'élimination du produit nécessite un rinçage soigné à l'eau.
Nettoyage du béton		
Eau à basse pression (< 18MPa)	Bon enlèvement de la poussière, de la laitance, des résidus d'asphalte. Nettoyage des fissures, des joints.	Risques pour le personnel. Risque de trous si la surface du béton ne présente pas des caractéristiques homogènes.
Air comprimé	Nettoyage de poussière non adhérente, des fissures, des joints.	S'assurer que le compresseur ne dégage pas d'huile
Marteau léger pneumatique à aiguilles multiples	Enlèvement des clous, fils de ligature, morceaux de bois incrustés dans le béton…	Possible création de microfissurations dans les granulats du béton.
Sablage à sec	Avec sables synthétiques agréés, bonne préparation des bétons et armatures.	Nuages de poussière polluant. Nécessité d'un personnel qualifié avec ÉPI. Risques pour le personnel.
Sablage humide	Bonne préparation des surfaces de reprise.	Risque important de pollution des parties voisines. Prévoir une protection efficace.
Vapeur	Élimination de contaminants ayant pénétré dans le béton.	Risques pour le personnel.

Tableau n° 30 : techniques d'enlèvement du béton dégradé (synthèse des normes EN 1504-10 et P 95-101)

Photo n° 109 : résultat d'un décapage par sablage (crédit photo D. Poineau)

Photo n° 110 : sacs d'abrasif sans silice pour sablage (crédit photo D. Poineau)

Photo n° 111 : résultats d'une hydrodémolition (crédit photo SETRA - J.M. Lacombe)

Technique de préparation	traitement des défauts de planéité	Nettoyage des salissures peu adhérentes	Nettoyage des taches de gras	Amélioration de la rugosité superficielle	Élimination des micro-organismes
Égrenage, brossage et dépoussiérage		Oui			
Ponçage	Oui	Oui plus ou moins			
Lessivage avec détergents		Oui plus ou moins	Oui avec détergents et eau chaude		Oui avec biocides
Projection d'abrasifs à sec		Oui	Non	Oui	Oui
Projection d'abrasifs par voie humide		Oui	Non	Oui	Oui
Projection d'eau sous pression (Cf. NF EN 1504-10) :		Oui	Oui avec détergent et eau chaude	Après essai de convenance pour déterminer la pression optimale	Oui avec biocides
Basse pression P ≤ 18 MPa					
Haute pression 18 MPa < P ≤ 60 MPa					
Très haute pression P > 60 MPa					

Tableau n° 31 : choix des techniques de préparation du support (d'après le guide technique du LCPC de 2002)

Nota :

- ***l'annexe n°4*** *au présent guide donne des informations complémentaires sur le* ***matériel d'hydrodémolition*** *à utiliser en fonction du type de travail à effectuer ;*
- *l'article 4.2 du* ***GUIDE N°4 [FABEM]*** *donne les exigences sur la qualité des supports devant recevoir un enduit, une imprégnation, un revêtement…*

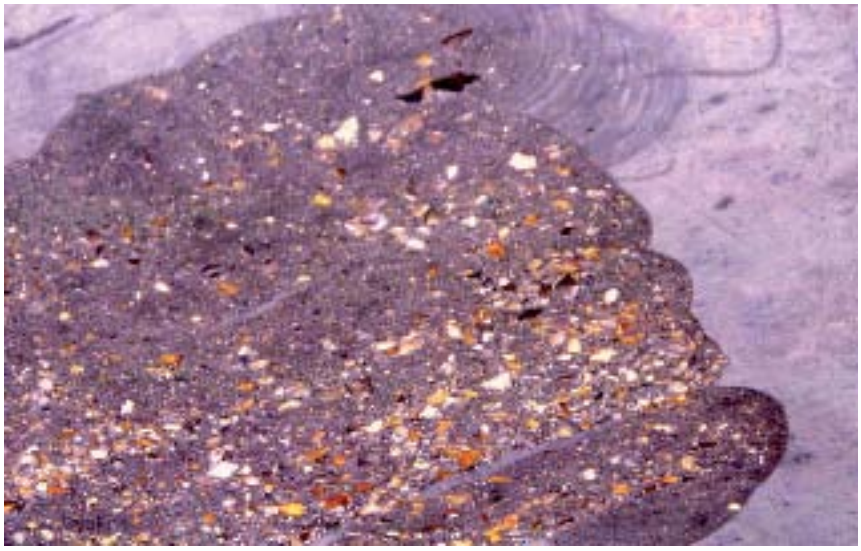


Photo n° 112 : résultat d'un décapage léger à l'eau sous pression (crédit photo D. Poineau)

Photo n° 113 : incidences néfaste du marteau-piqueur sur le ferraillage (crédit photo Poineau)

> Le marché peut imposer mais aussi interdire certaines de ces méthodes en fonction des avantages ou des risques qu'elles présentent :

- **pour le personnel :** la projection d'abrasifs à sec, le décapage à l'eau à haute pression nécessitent de prévoir des équipements de protection individuelle agréés ;
- **pour l'environnement :** la projection d'abrasifs à sec, le décapage chimique avec des acides dilués imposent de prévoir le recueil des déchets polluants ;
- **pour le béton :** le rabotage mécanique, le décapage thermique (intense) risquent de provoquer des amorces de fissures, les marteaux-piqueurs provoquent des déformations du ferraillage…

> La ou les techniques de préparation du support en béton doivent satisfaire aux exigences de l'article 7.2 de la norme NF EN 1504-10, dont les principales sont détaillées ci-après avec, entre parenthèses, quelques explications :

- l'étendue et la profondeur de la préparation doivent être conformes au principe et à **la méthode de réparation ou de renforcement du béton et/ou à celle de préservation et de restauration de la passivité ;**
- l'intégrité structurale doit être assurée, si nécessaire par **un étaiement provisoire ;**

- l'importance de la préparation doit tenir compte de la **profondeur de carbonatation** et **des profils de concentration des chlorures** et autres contaminants (après réparation et diffusion des contaminants restants, ces produits doivent rester nettement en dessous des taux critiques sauf dans le cas ou un traitement électrochimique est mis en œuvre) ;
- le béton ou le mortier de réparation ou de renforcement doit pouvoir être correctement compacté, en particulier autour des armatures, ce qui impose un dégagement minimal de celles-ci ;
- les bords de la zone où du béton a été enlevé doivent être taillés suivant un angle compris entre 90° et 135° à ± 5°pour assurer une bonne liaison mécanique entre le matériau d'origine et celui d'apport ;
- les armatures doivent être traitées contre la corrosion (sauf si le mortier ou le béton est mis en place par projection en voie sèche ou s'il y a un traitement électrochimique).

Photo n° 114 : étaiement provisoire

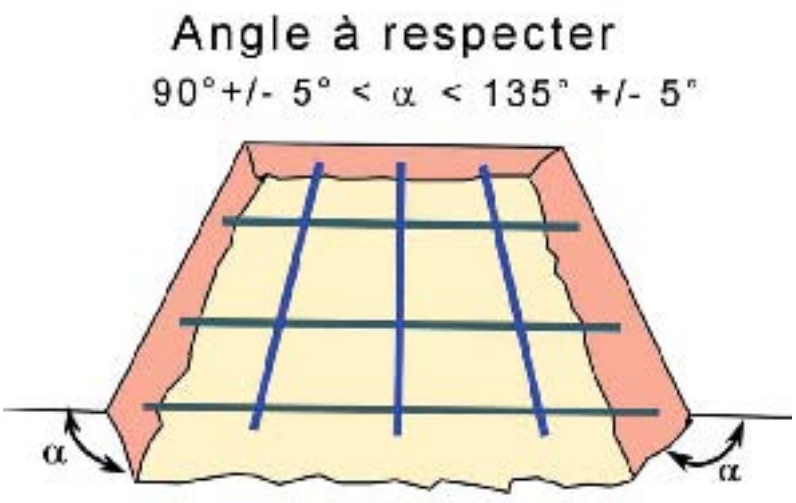


Figure n° 31 : dispositions à respecter pour le dégagement des armatures

4.2.1.2.3 Préparation des armatures – Exigences de résultats

Nota : *avant de lire le présent article, le lecteur est invité à se reporter à l'article 3.2.3.3.8.2 ci-dessus qui traite des phénomènes provoquant la corrosion des armatures et à l'article 3.2.6.3 ci-dessus.*

Dans le cas où les armatures de béton armé sont corrodées, il faut les dégager sur tout leur tracé et tout leur périmètre. Le dégarnissage doit être fait jusqu'à ce qu'apparaissent la partie non corrodée sur une longueur d'au moins 50 mm.

Photo n° 115 : toutes les armatures corrodées doivent être dégagées

Pour permettre une bonne mise en place et un bon compactage du matériau de réparation, le croquis suivant donne la **distance minimale «d»** à respecter entre la barre et le support repiqué (Cg représente la dimension maximale du granulat). Cette distance «d» est au minimum égale à la plus grande des deux valeurs suivantes : 15mm ou Cg + 5 mm.

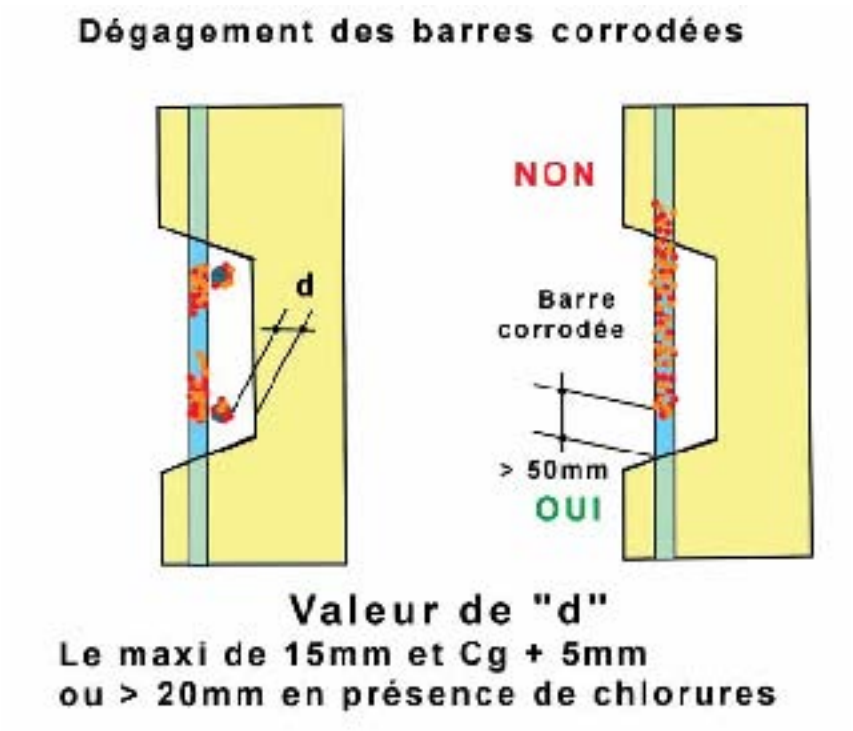


Figure n° 32 : distance minimale à respecter entre la barre et le béton lors de la préparation du support

Si le béton est contaminé par les chlorures, la distance minimale est à porter à 20 mm. De plus, **un lavage soigné** du béton et des armatures est à effectuer à l'eau sous pression (< 18 MPa)

En l'absence de toute trace de corrosion, le béton carbonaté et/ou pollué par des chlorures peut rester en place **si le traitement fait appel aux méthodes électrochimiques** (sous réserve que la résistivité soit compatible avec la méthode) ou lorsque la teneur en eau du béton est très faible (forte résistivité) et peut le rester (environnement sec).

Si la méthode de réparation prévoit la mise en place **d'un revêtement anticorrosion contenant des pigments actifs** (par exemple, de type inhibiteur) sur les barres, le décapage des barres doit atteindre le niveau Sa2 «nettoyage – décapage profond».

Si la méthode de réparation prévoit la mise en place **d'un revêtement de protection** (film étanche à base de résines) sur les barres, le décapage des barres doit atteindre le niveau $Sa2^{1/2}$ «nettoyage – décapage très profond».

Photo n° 116 : entassement de barres

Parfois, dans certaines parties d'une structure, la concentration des barres, le faible espacement entre les barres ou les paquets de barres rend **l'enlèvement du béton carbonaté et/ou pollué et le nettoyage très difficile** (les mesures du potentiel d'armature peuvent renseigner l'existence d'une corrosion). Dans un tel cas, il est conseillé, soit de mettre en œuvre une méthode électrochimique, soit de renforcer l'efficacité de la méthode de réparation au moyen de produits à base de liants hydrauliques (apport d'alcalins), par exemple, au moyen d'un revêtement d'étanchéité aux gaz et aux liquides…

> L'élimination des parties oxydées se fait par brossage métallique, repiquage, sablage, grenaillage ou à l'eau sous très haute pression. Dès que les traces d'oxydation ont disparu, les quatre cas suivants se présentent :

a) la mise en place **d'un revêtement anticorrosion sur les armatures est inutile** si le mortier ou le béton à base de liants hydrauliques de restauration est mis en œuvre par projection par voie sèche. Cette technique étant incompatible avec tout revêtement sur les armatures) ;

b) la mise en œuvre **d'un revêtement anticorrosion sur les armatures n'est pas forcément nécessaire** en l'absence de produits agressifs dans le béton (chlorures…) et si les armatures ne sont que peu ou pas corrodées, sous réserve que le mortier ou le béton de restauration soit à base de liants hydrauliques et soit **mis en œuvre immédiatement et en épaisseur suffisante** pour assurer un recouvrement des barres conformes aux exigences d'environnement et si l'environnement n'est pas trop agressif ;

c) la mise en œuvre **d'un revêtement anticorrosion sur les armatures est nécessaire** si les armatures sont nettement corrodées ou si le mortier ou le béton à base de liants hydrauliques de restauration **ne peut être mis en œuvre immédiatement et/ou en épaisseur suffisante** pour assurer un recouvrement des barres conformes aux exigences d'environnement ;

d) la mise en œuvre **d'un revêtement anticorrosion sur les armatures est impérati**f lorsque le mortier ou le béton est à base **de liants organiques.**

ATTENTION : *les revêtements anticorrosion doivent être appliqués sur les armatures* ***sans déborder sur le béton.*** *Si l'entassement des armatures rend cette application très difficile, il est possible d'utiliser une barbotine à base de liants hydraulique et de styrène butadiène. Dans un tel cas, il faut impérativement mettre en œuvre le mortier (ou le béton) destiné à reconstituer l'enrobage des armatures avant la prise de la barbotine.*

Photo n° 117 : mauvaise application d'un revêtement anticorrosion (crédit photo D. Poineau)

Rappel : en cas de recours à un revêtement anticorrosion non actif, la totalité de la surface de l'armature doit être recouvert par le produit et en épaisseur suffisante. De plus, toute blessure du film est à proscrire pour éviter le développement d'une corrosion pernicieuse sous le film. L'utilisation de ces types de produits est donc limitée en réparation

RAPPEL, en cas de présence de rouille sur les parties des barres qui sont recouvertes de béton apparemment sain et compact juste à côté d'une zone réparée par remplacement du béton pollué, un nouveau couple galvanique va se former entre la zone réparée, qui va jouer le rôle de cathode, et les deux zones non réparées, qui vont va jouer le rôle d'anode *(phénomène appelé inversion de polarité)*, avec développement de deux nouvelles zones de corrosion.

Ce phénomène **d'inversion de polarité** va aussi survenir si les zones voisines d'une zone réparée sont proches d'être **entièrement carbonatées ou d'atteindre le taux de chlorures ou d'autres polluants limite,** c'est-à-dire **qu'une corrosion généralisée** va bientôt se développer. Dans un tel cas, la corrosion se développera, mais plus tardivement que dans le cas précédent.

Ces phénomènes d'inversion de polarité ou de corrosion généralisée peuvent être retardés ou empêchés avec la mise en œuvre d'une ou de plusieurs des méthodes de réparation suivantes :

- un remplacement complet du béton carbonaté et/ou pollué et ce, sur toute la surface de la structure ;
- l'augmentation du recouvrement des armatures ;
- une ré-alcalinisation par diffusion avec la mise en place d'une couche de recouvrement en mortier ou béton sur toute la surface de béton carbonaté ;
- une application d'inhibiteurs de corrosion sur la surface du béton ;
- une déchloruration, si nécessaire, suivie d'une ré-alcalinisation ;
- une protection cathodique ;
- un revêtement totalement étanche aux gaz ou aux liquides (à exclure dans le domaine du bâtiment car les murs doivent pouvoir laisser passer la vapeur d'eau)...

Photo n° 118 : exemple de réparation développant une inversion de polarité

Les armatures les plus attaquées par la corrosion, après mesure de leur diamètre résiduel, doivent être remplacées si la réduction de la section résistante (vis-à-vis de la flexion, du cisaillement…) est suffisamment marquée. L'enlèvement et le remplacement des armatures doivent être effectués sans provoquer de désordres, ni dans le béton (fissures, éclatements…), ni dans les armatures restantes (déformations, dépliages, ruptures, coupes sauvages…).

Le recours à **la soudure bout à bout et par recouvrement** est parfois nécessaire si les dispositions du ferraillage rendent difficile la mise en place d'armatures supplémentaires en recouvrement classique, sous réserve que les barres soient soudables. Les techniques de soudage à utiliser sont précisées dans les normes relatives aux armatures de béton armé. Des coupleurs ou manchons peuvent également être utilisés.

Photo n° 119 : exemple de soudures de barres de béton armé (crédit photo SIKA)

L'ajout de barres peut nécessiter **leur scellement** dans le béton support. Se reporter au **FASCICULE N°7 [FABEM]** qui explicite la préparation du support et des trous et/ou forages nécessaires au scellement. Il est à noter que la préparation du support fait appel aux techniques visées ci-dessus, seul le traitement des trous et/ou forages fait l'objet de prescriptions supplémentaires. Le fascicule de documentation **FD P 18-823** donne des recommandations pour le dimensionnement des scellements de barres d'armatures dans le béton.

4.2.1.2.4 Nettoyage des surfaces – Exigences de résultats

Après la préparation du support béton et des armatures, il faut éliminer tous les résidus (poussières, souillures, morceaux de béton, parcelles d'anciens revêtements…). **Cette opération de nettoyage des surfaces** est réalisée immédiatement avant la mise en œuvre des mortiers et bétons ou de la couche d'accrochage. **L'entrepreneur** doit s'assurer de la compatibilité entre la méthode de nettoyage prévue et les produits de réparation à mettre en œuvre en cas de restauration ou d'ajout de béton (support sec ou humide).

> Les méthodes de nettoyage utilisables peuvent être :

- à sec : brossage, aspiration, soufflage à l'air déshuilé (un compresseur en bon état ne produit pas un air comprimé chargé d'huile) ;
- humide : lavage à l'eau, avec ou sans détergent.

Dans le cas du lavage à l'eau, les excédents d'eau doivent être éliminés, soit par soufflage à l'air déshuilé, soit par aspiration. De plus, avant l'application des produits, le support doit présenter un état de dessiccation ou d'humidification compatible avec les produits utilisés.

4.2.1.2.5 Dispositions particulières liées à la nature des produits de réparation

Produits à base de liants hydrauliques

Dans le cas de surfaces très poreuses ou à faible pourcentage de liant, il est nécessaire d'appliquer au préalable une couche de barbotine à base de liant hydraulique. L'eau de gâchage peut aussi être additionnée de lastex, ce qui améliore l'adhérence.

Dans le cas général, le support béton doit être saturé d'eau mais non ruisselant et l'application se fait sur un support à une température supérieure à 5 °C.

Produits à base de liants hydrauliques modifiés

La notice du fabricant définit l'état de surface à exiger et, dans le cas de surfaces très poreuses ou à faible pourcentage de liant, il est nécessaire d'appliquer au préalable une couche de barbotine à base de liant hydraulique modifié.

Les armatures dégagées peuvent ne pas être traitées par un passivant après leur préparation, sauf lorsque l'ouvrage est situé en milieu agressif ou lorsqu'une couche d'accrochage initiale à base de polymère a été nécessaire.

Produits à base de résines synthétiques

En règle générale le support béton doit être sec, sauf si la résine est compatible avec une surface humide.

Le fabricant doit préciser si une couche primaire d'accrochage est nécessaire.

Les armatures doivent obligatoirement recevoir un revêtement à pigments actifs anticorrosion compatible avec la résine synthétique utilisée.

4.2.1.2.6 Rappels sur les particularités des préparations du support avant mise en œuvre des méthodes de réparation du groupe 2

4.2.1.2.6.1 Cas des techniques traitées par les autres guides [FABEM] du STRRES

Méthode de réparation	Guides [FABEM] de référence	Observations
Traitement des fissures par calfeutrement, pontage…	N°2	Voir l'article n°4.2
Traitement des fissures et des cavités internes par injection	N°3	Voir l'article n°4.2
Mise en œuvre d'imprégnations, d'imprégnations hydrophobes, et de revêtements	N°4	Voir l'article n°4.2
Mise en place de mortier et béton par projection	N°5	Voir la norme NF EN 14487-2 et les techniques de préparation du support de la norme NF P 95-102 et du GUIDE N 1 [FABEM]
Collage d'armatures passives additionnelles extérieures au béton (tôle, plaques et tissus collés)	N°7	Se reporter au guide de juin 2007 de l'AFCG
Ajout de forces par précontrainte additionnelle ou déformations imposées	N°8	Se reporter à la norme NF P 95-104
Réinjection des conduits des armatures de pré-contrainte	N°8	Se reporter au chapitre 8 du livre : Maintenance et réparation des ponts paru aux presses de l'ENPC en 1997.

Tableau n° 32 : documents de référence sur les techniques de préparation du support

4.2.1.2.6.2 Cas des techniques traitées par une norme ou un document de niveau identique

■ **ajout d'armatures internes au béton avec ou sans soudure :**

Cette opération correspond à la pose des armatures de béton armé qui relève du DTU 21 ou du fascicule 65A.

■ **nouveau mortier ou béton coulé :**

Il s'agit d'une reprise de bétonnage dont le calcul et la conception relèvent des **règles BAEL ou BPEL** (dimensionnement et positionnement des armatures de couture) et la réalisation du **DTU 21** ou **du fascicule 65A** (voir aussi les recommandations pour l'exécution des reprises de bétonnage **CEBTP, FFB et Sétra).**

Il est recommandé d'orienter la reprise de bétonnage de telle sorte qu'elle soit soumise à une compression. Si elle est soumise à des cisaillements et/ou tendue, il faut ménager des redans convenablement disposés. Dans les deux cas, la surface doit présenter des indentations d'environ 5 mm de hauteur qui assurent une rugosité suffisante.

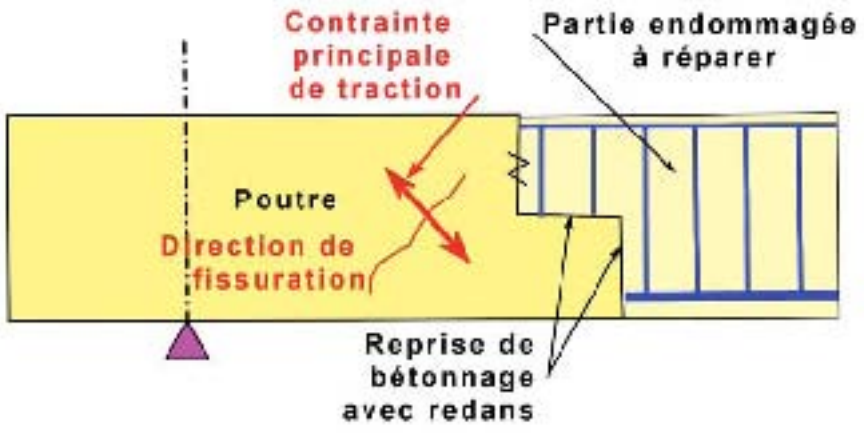


Figure n° 33 : Principe d'une reprise de bétonnage avec redans

Si un produit (barbotine, colle) doit être mis en œuvre pour améliorer l'adhérence entre le béton frais et le béton durci, les consignes de la fiche technique du produit concernant l'état de surface doivent être respectées.

■ **ré-alcalinisation électrochimique du béton carbonaté :**

Cette méthode fait l'objet du fascicule de documentation **FD CEN/TS 14-308-1. Les réparations** (béton délaminé, nids de cailloux, armatures corrodées ...) doivent être effectuées avant l'opération. Ces réparations comprennent l'enlèvement des produits de réparations anciennes dont la résistivité dépasse de plus de 200% celle du béton de la structure. Le produit ou le système utilisé pour la réparation doit respecter le seuil de résistivité de 200%.

La préparation de la surface du béton de la pièce consiste en un nettoyage, voire un décapage destiné à enlever la poussière, les salissures, les revêtements existants... , c'est-à-dire tous les produits présents à la surface du béton et qui pourraient gêner le passage du courant. Il faut aussi couper ou isoler ou enlever les clous, morceaux de ligatures..., qui, en contact avec les armatures, pourraient provoquer des courts-circuits.

Si la méthode fait l'objet d'un brevet, il faut appliquer en sus les dispositions particulières de la fiche technique concernant la préparation du substrat.

■ **prévention ou protection cathodique :**

La protection cathodique des structures non-immergées et non au contact du sol fait l'objet de la norme NF EN 12696. Comme dans les autres traitements électrochimiques :

- les réparations doivent être effectuées avant le traitement en respectant les mêmes impératifs ;
- seul le seuil de résistivité est fixé dans une fourchette entre 50 à 200% ;
- la préparation des surfaces doit également respecter les mêmes exigences.

Les ensembles anodiques peuvent être à base de revêtements conducteurs placés à la surface du béton ou à base d'anodes en titane activées, qui peuvent être placées, soit à la surface du béton puis enrobées dans un mortier, soit encastrées dans des rainures, soit, enfin, intégrées à la structure dans des forages. Il est donc nécessaire, suivant le cas, de procéder à des préparations de surface complémentaires pour réaliser les rainures, les trous. **Les guides [FABEM] 2, 3, 4 et 7 du STRRES** donnent des indications sur les outils pouvant être utilisés.

Si la méthode fait l'objet d'un brevet, il faut appliquer en sus les dispositions de la fiche technique concernant la préparation du substrat.

4.2.1.2.6.3 Cas des autres techniques

> Mise en œuvre de produits ou systèmes de collage structural des bétons (béton durci sur béton durci et béton frais sur béton durci) :

La colle doit pouvoir pénétrer la surface du béton. La préparation de surface est analogue à celle préconisée pour les produits et systèmes d'imprégnation du béton. L'article 4.2.2 du **GUIDE N°4 [FABEM]** décrit, dans le domaine du bâtiment comme celui du génie civil, les techniques de préparation de surface. Les anciens revêtements et la laitance doivent être éliminés, ainsi que toute trace de graisse… (si la surface du béton a fait l'objet d'une d'imprégnation, il faut éliminer la couche de béton imprégnée, soit au maximum de l'ordre de 5 millimètres).

Les consignes de la fiche technique du produit concernant l'état de surface doivent être respectées.

> Mise en œuvre de produits ou systèmes de scellement des armatures de béton armé :

Les trous de scellement doivent être propres (absence de détritus et de poussière) et leur surface adhérente (en cas de carottage avec une couronne diamantée, il faut «déglacer» la surface). Le reste de la surface doit pouvoir permettre de réaliser une reprise de bétonnage de qualité (se reporter à l'article 4.2.1.2.6.2 ci-dessus).

Les consignes de la fiche technique du produit concernant l'état de surface doivent être respectées.

> Mise en œuvre de produits et systèmes pour le calage d'éléments :

L'état de surface doit permettre de réaliser une reprise de bétonnage de qualité (se reporter à l'article 4.2.1.2.6.2 ci-dessus).

Les consignes de la fiche technique du produit concernant l'état de surface doivent être respectées.

> extraction électrochimique des chlorures :

Cette méthode ne fait l'objet d'aucune norme. Les dispositions applicables ci-dessus en cas de ré-alcalinisation sont, bien entendu, applicables à une opération de déminéralisation.

Si la méthode fait l'objet d'un brevet, il faut appliquer en sus les dispositions **particulières de la fiche technique** concernant la préparation du substrat.

> mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion :

Les inhibiteurs doivent pouvoir pénétrer dans le béton. La préparation de surface est analogue à celle préconisée pour les produits et systèmes d'imprégnation du béton. **L'article 4.2.2 du GUIDE N°4 [FABEM]** décrit, dans le domaine du bâtiment comme celui du génie civil, les techniques de préparation de surface. Il faut éliminer les poussières, les salissures, les peintures, les revêtements existants (si la surface du béton a fait l'objet d'une d'imprégnation, il faut éliminer la couche de béton imprégnée, soit au maximum de l'ordre de 5 millimètres). De plus, il faut obtenir une surface absorbante, ce qui peut imposer un «déglaçage» de la surface... **La fiche technique du produit** ou système fixe également les exigences liées à la préparation du substrat. Voir l'article 4.3.3.4.7 ci-dessous qui impose des nettoyages supplémentaires après pénétration du produit et avant de procéder aux réparations locales....

4.3.1 GÉNÉRALITÉS

Le marché demande à **l'entrepreneur** de proposer à l'acceptation **du maître d'œuvre les deux procédures et les deux cadres de documents de suivi relatifs, d'une part, à la préparation de l'opération et, d'autre part, à la réalisation de l'opération. Les techniques, le personnel ainsi que les moyens et produits à mettre en œuvre** seront ensuite validés par **l'épreuve de convenance** correspondante.

Ces deux procédures sont intégrées dans **la procédure relative aux travaux** et ces deux cadres de documents de suivi sont intégrés dans **le cadre du document de suivi des travaux.** Ces deux documents généraux sont visés dans l'article 4.1 ci-devant.

> Doivent être disponibles sur le chantier :

- **les procédures de préparation et de mise en œuvre de l'opération et les documents de suivi ;**
- **les fiches techniques** qui définissent les conditions de préparation et de mise en œuvre des produits et les matériels à utiliser ;
- **les fiches de données de sécurité (FDS)** qui définissent les précautions à prendre ;
- **le personnel et le matériel nécessaires à la préparation des produits et à leur mise en œuvre…**

> Il faut impérativement respecter :

- **les limites d'emploi des produits** liées à la température et à l'hygrométrie ambiante et à la température et à l'humidité du support ;
- **le temps et les conditions de mélange** (vitesse et durée de malaxage) ;
- **les précautions à prendre** en fonction des risques que présentent les produits (toxicité, inflammation, explosion…) ;
- **le temps de mûrissement et la durée pratique d'utilisation** des produits de type multi-composants (par exemple, base + durcisseur + charges)…

L'opération de mise en œuvre d'un produit ou d'un système de réparation du béton ne peut avoir lieu que si les conditions thermiques et hygrométriques d'emploi des produits sont respectées (se reporter à **la fiche technique du produit et à la procédure d'exécution**). Il est donc nécessaire **de mesurer la température du support et celle de l'atmosphère ambiante ainsi que l'hygrométrie de l'air,** avant tout début de l'opération. Ces mesures doivent être renouvelées si les conditions climatiques évoluent pendant l'opération. La mise en place d'un abri de protection peut permettre d'éviter des variations trop rapides de la température du support.

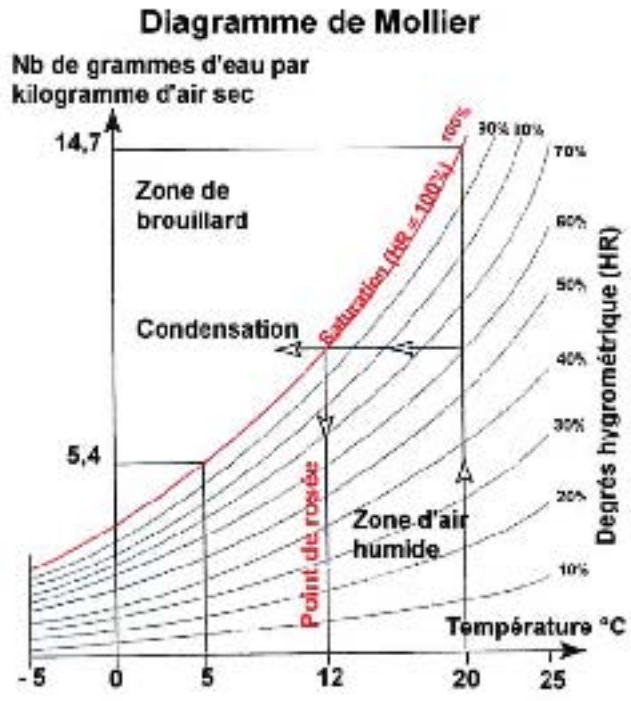


Figure n° 34 : diagramme de Mollier pour la détermination du point de rosée

L'essai n° 25 relatif au **«point de rosée»** de la norme harmonisée **NF EN 1504-10** donne un extrait du tableau de la norme **ISO 4677-1** et de la norme **ISO 4677-2** qui précisent les températures du point de rosée en fonction de la température sèche ambiante et de l'humidité atmosphérique relative ambiante. Il est aussi possible d'utiliser l'abaque de la Figure n° 34 ci-devant.

Par exemple, pour une température extérieure de 20°C et une humidité relative de 60%, la condensation se produit sur le support si sa température est inférieure ou égale à 12°C.

4.3.2 PRÉPARATION DES PRODUITS

4.3.2.1 Généralités

Rappel : 16 méthodes de réparation du béton, de renforcement structural et de préservation ou de restauration de la passivité des armatures sont traitées dans le présent guide.

Les normes françaises de la série **NF P 95-1**** et les normes européennes de la série **NF EN 1504-**** ne donnent que peu d'indications sur **la préparation des produits et des systèmes utilisés dans chaque méthode.**

L'article 3.6.3 ci-dessus ci-devant qui traite **des matériels de préparation des produits** détaille, en fonction des types de produits (produits monocomposant, produits multicomposants, mortiers à base de liants hydrauliques…), les précautions générales à respecter (vitesse et durée de malaxage, durée de mûrissement…). **Il convient donc de se reporter à cet article ainsi qu'aux fiches techniques des fabricants.**

Il est également possible de se référer aux différents **guides du STRRES** auxquels il est fait renvoi (par exemple, pour l'injection et le remplissage des fissures et des vides du béton…).

Enfin, la préparation de certains produits comme le béton relève de normes **(NF EN 206-1),** celle d'autres produits comme les armatures de béton armé relève du **DTU 21 ou du fascicule 65A…**

Il est rappelé que la préparation des produits et systèmes fait l'objet **d'une procédure et d'un document de suivi.**

Le présent guide donne simplement, ci-après, quelques règles génériques sur la préparation des produits. Il n'a pas été jugé utile de développer davantage ce point.

> Rappel : avant, mais, le plus souvent après, une réparation structurale ou non structurale et/ou une restauration de la passivité des armatures, il peut être nécessaire de réaliser :

- un colmatage ou un remplissage ou un pontage des fissures existantes dans le cadre d'une protection contre la pénétration d'agents agressifs. Se reporter, **pour la préparation des produits et systèmes, au GUIDE N°2 [FABEM] ;**
- **une protection supplémentaire,** soit contre la pénétration d'agents agressifs et/ou de l'humidité, soit pour améliorer la résistance physique et/ou chimique, voire pour augmenter la résistivité et/ou assurer un contrôle cathodique. Cette protection peut être assurée par une imprégnation hydrophobe ou non, un revêtement… Se reporter, **pour la préparation des produits et systèmes, au GUIDE N°4 [FABEM].**

4.3.2.2 Préparation des produits prêts à l'emploi

Les récipients et les outils utilisés doivent être propres et secs.

Les produits sont le plus souvent en **conditionnements prédosés (ou «kits»). Ces conditionnements ne doivent jamais être fractionnés.** En effet, tout manquement à cette règle peut entraîner, par exemple pour un mortier à base de liants organiques, la perte de ses caractéristiques mécaniques par défaut de polymérisation de la résine.

Les produits doivent être préparés et mélangés en suivant scrupuleusement **les indications de la fiche technique du fabricant et de la procédure.** En particulier, il faut respecter l'ordre d'introduction des différents constituants.

Il est rappelé que pour les produits et systèmes à base de liants organiques, la vitesse de rotation du malaxeur (quelques centaines de tours par minute) et la forme de l'hélice doivent être adaptées pour permettre un mélange homogène en consistance et couleur des composants, qui sont plus ou moins visqueux et pour éviter l'inclusion d'air dans le mélange.

4.3.2.3 Préparation des produits fabriqués sur le chantier

Les récipients et les outils utilisés doivent être propres et secs.

Les produits doivent être préparés mélangés en suivant scrupuleusement **les indications de la procédure.** En particulier, il faut respecter l'ordre d'introduction des différents constituants et leur dosage.

Le chantier doit donc disposer **de moyens de pesage étalonnés** permettant de satisfaire aux mêmes tolérances de fabrication que les produits prêts à l'emploi normalisés du même type. Des tolérances, pour chaque type de produit ou de système, sont fixées dans les normes relatives aux produits (se reporter aux exigences d'identification des normes 1504-2 à 1504-7). L'organisation du contrôle de la qualité peut être calquée sur **le contrôle de la production en usine (CPU)** développé dans la norme **NF EN 1504-8.**

Avant toute mise en œuvre, ces produits sont soumis à **une épreuve de convenance de fabrication** pour s'assurer qu'ils peuvent être fabriqués sur le chantier en respectant les tolérances prévues **au marché** et dans **la procédure d'exécution.**

4.3.2.4 Préparation des autres produits (béton, armatures…) et des constituants (granulats, adjuvants…)

Ces produits doivent être préparés conformément aux dispositions des textes de référence **(NF EN 206-1, DTU 21, fascicule 65A…)** auxquels le marché doit faire référence.

4.3.3 RÉALISATION DE L'OPÉRATION

4.3.3.1 Généralités

La mise en œuvre d'une opération, soit de restauration du béton ou de renforcement structural, soit de restauration ou de préservation de la passivité, **sauf disposition contraire du marché, ne peut avoir lieu sans un accord formel du maître d'œuvre (POINT D'ARRÊT).**

La levée du **POINT D'ARRÊT** est conditionnée à la validation par le maître d'œuvre des épreuves de convenance et des contrôles sur la préparation du support, de l'opération, des produits.

L'opération est préparée et réalisée conformément aux dispositions de **la procédure correspondante,** qui reprend les dispositions **du marché,** celles des fiches techniques des produits, les prescriptions des normes en vigueur (suivant le type de travail à réaliser, les articles correspondants de la norme **NF EN 1504-10** et/ou des normes de la série **NF P 95-1**, le DTU21, le DTU 42.1** [réfection des façades par revêtements à base de polymères] et **le fascicule 65A**, voire les règles de l'art). **Le document de suivi** correspondant est rempli au fur et à mesure de l'avancement des opérations.

Le nom exact de la procédure de réalisation de l'opération dépend de la méthode de réparation et/ou renforcement mise en œuvre.

> Dans le cas des produits prêts à l'emploi, la fiche technique indique les exigences à respecter. La procédure de réalisation de l'opération doit les reprendre sous forme de prescriptions :

- le ou les matériels à utiliser ;
- la qualité que doit présenter le support ;
- la plage des températures d'utilisation (Tmin et Tmax) ;
- les précautions à prendre par temps froid (par exemple, gâchage à l'eau tiède si la température est proche du Tmin) ou par temps chaud ;
- l'interdiction d'appliquer le produit sur un support gelé ou en cours de dégel ou s'il va geler dans moins de 24 heures ;
- le temps de repos à respecter après le malaxage ;
- la durée de vie du mélange en fonction de la température ambiante ;
- les épaisseurs minimales et maximales des couches successives en fonction de la position du support (surface horizontale, verticale ou en sous-face) ;
- l'enrobage minimal à réaliser au dessus des armatures ;
- le délai d'attente avant le talochage ;
- le délai minimum à observer avant le décoffrage ;
- le délai de recouvrement entre les couches (minimal et maximal) ;
- de délai à observer avant la remise en circulation piétonne (cas des surfaces horizontales);
- la consommation prévisible en produit (épaisseur et poids) ;
- le traitement des points particuliers…

Dans le cas des produits préparés sur chantier, la procédure de réalisation de l'opération doit fixer les exigences en s'inspirant de la liste ci-dessus.

Dans la suite du présent article sont passées en revue les différentes méthodes qui, combinées ou non, permettent de satisfaire aux trois fonctions principales :

- la restauration du béton ;
- le renforcement structural ;
- la préservation et la restauration de la passivité des armatures.

Bien entendu, un simple renvoi aux guides **du STRRES** est effectué si la procédure de mise en œuvre de la méthode de réparation y est décrite en détail (par exemple, les injections). Si, au contraire, la procédure est décrite dans une norme à laquelle fait référence la norme européenne **NF EN 1504-10,** les points clefs de cette norme sont décryptés.

> Rappel : avant, mais, le plus souvent après, une réparation structurale ou non structurale et/ou une restauration de la passivité des armatures, il peut être nécessaire de réaliser :

- un colmatage ou un remplissage ou un pontage des fissures existantes dans le cadre d'une protection contre la pénétration d'agents agressifs. Se reporter, **pour la réalisation de l'opération, au GUIDE N°2 [FABEM] ;**

- **une protection supplémentaire,** soit contre la pénétration d'agents agressifs et/ou de l'humidité, soit pour améliorer la résistance physique et/ou chimique, voire pour augmenter la résistivité et/ou assurer un contrôle cathodique. Cette protection peut être assurée par une imprégnation hydrophobe ou non, un revêtement… Se reporter, **pour la réalisation de l'opération, au GUIDE N°4 [FABEM].**

> Peut-on s'appuyer uniquement sur les deux principales normes de références, qui traitent des méthodes satisfaisant aux trois fonctions ? La réponse est non, comme le montre, ci-après, l'analyse de ces deux textes :

- **La norme NF P 95-101 :**

Cette norme relative à la reprise des dégradations superficielles ne traite dans son article 6 **que des techniques de mise en œuvre des trois familles de produits** (ceux à base de liants hydrauliques ou de liants hydrauliques modifiés ou de liants de synthèses). **Les exigences d'exécution sont très générales** et à peu de chose près très voisines pour les trois types de produits. Il n'y a pas d'indication sur les techniques de mise en œuvre, soit manuelles, soit mécanisées.

- **La norme NF EN 1504-10 :**

Cette norme décrit les exigences auxquelles doivent satisfaire les principales techniques de mise en œuvre manuelles et mécanisées. Elle reste quasiment muette sur les méthodes connexes (scellement d'armatures, les injections des vides…).

4.3.3.2 Réalisation d'une opération de restauration du béton

4.3.3.2.1 Généralités

Il s'agit de la mise en œuvre de produits ou systèmes en faible ou en forte épaisseur appliqués manuellement ou mécaniquement. Les exigences générales développées ci-après pour les trois familles de produits ou systèmes sont reprises avec des compléments des deux normes de référence.

Lorsque les réparations sont de faible importance en surface et volume, les produits et systèmes sont mis en œuvre manuellement. Dans le cas contraire la mise en œuvre est mécanisée.

La mise en œuvre est effectuée manuellement ou mécaniquement avec le matériel adapté au type de produit, à l'importance des travaux et à la finition recherchée.

Les matériels de mise en œuvre sont ceux fixés par **la fiche technique et la procédure de mise en œuvre de l'opération. Ces matériels d'application** des différents types de produits et systèmes sont décrits en détail dans l'article 3.6.4 ci-dessus auquel il convient de se référer.

Rappel, avant toute réalisation de la réparation, une protection contre le vent, le soleil (ensoleillement direct) ou la pluie est à mettre en place en fonction des règles de l'art et des recommandations de la fiche technique du produit ou du système. Toutes ces exigences sont reprises dans la procédure d'exécution.

Lorsque la structure à réparer a tendance à vibrer (par exemple, sous les effets des engins utilisés lors des travaux ou sous les effets du trafic car l'ouvrage doit être maintenu en service pendant tout ou partie de l'opération), il y a lieu de s'assurer que **les vibrations éventuelles** ne risquent pas de provoquer la décohésion du produit ou du système mis en œuvre. Ces vibrations sont particulièrement à redouter pour les mortiers et les bétons projetés. Dans un tel cas, **le marché** peut imposer lors de **l'épreuve de convenance :**

- la réalisation de plaquettes étalon, dont une partie est à fixer à la structure et l'autre à conserver sur le chantier dans les mêmes conditions thermiques et hygrométriques ;
- la mesure de l'intensité des vibrations, en particulier au droit des zones les plus sollicitées;
- la mise œuvre du produit ou du système sur les deux catégories de plaquettes étalon ;
- la mesure de l'adhérence du produit ou du système une fois durci (sondage au marteau, essai de traction directe…).

Nota : *la structure elle-même peut servir de plaquette étalon si il est possible de réaliser l'épreuve de convenance avec ou sans vibration.*

La simple restauration du béton d'une structure peut, dans certains cas, fait appel **aux techniques complémentaires** visées dans l'article 4.3.3.3 ci-dessous relatif à la réalisation d'un renforcement structural (collage de béton frais sur béton durci, injection de l'interface entre le produit de réparation et le support en béton…).

Rappel : si un revêtement (ou une barbotine) est appliqué sur les armatures, le mortier (ou le béton) de restauration doit être mis en œuvre en respectant le délai d'utilisation prévu par la notice d'emploi du produit de revêtement (pour une barbotine, avant la fin de prise de celle-ci).

4.3.3.2.1.1 Mise en œuvre des produits à base de liants hydrauliques

Quel que soit leur mode de conditionnement et de préparation, les produits et systèmes sont mis en œuvre dans les délais les plus brefs après l'arrêt du malaxage. Le délai de mûrissement dépend de la nature du liant, de la température ambiante et de l'adjonction éventuelle d'un adjuvant.

Tout mortier ou béton n'ayant pu être utilisé dans les délais ou présentant un commencement de prise doit être rejeté. Il ne doit jamais être mélangé à du mortier ou du béton frais. Le remalaxage est strictement interdit.

Dans le cas de mise en place dans un coffrage, son dimensionnement, sa raideur et sa fixation doivent être tels qu'aucun mouvement ne puisse se produire en provoquant une fissuration interne ou une décohésion avec ou sans décollage de la reprise.

En l'absence de mise en œuvre d'un primaire, le support doit être humidifié, mais sans excès (le support doit présenter un aspect sombre et mat et non brillant).

Afin d'améliorer la liaison entre mortiers et supports, il peut être nécessaire, sauf s'il s'agit de béton projeté, d'appliquer un produit d'adhérence à base de résine ou de liants hydrauliques modifiés (PCC). L'application de mortier PCC est cependant délicate, en particulier dans les zones fortement armées. Les délais prescrits entre l'application du produit (ou «primaire») d'adhérence et celle des mortiers ou bétons de reprise doivent être scrupuleusement respectés. Ces délais dépendent généralement de la température ambiante et de celle du support.

Dans tous les cas, il faut procéder à une cure soignée pour limiter au maximum la dessiccation et le fissuration du plan de reprise.

4.3.3.2.1.2 Mise en œuvre des produits à base de liants hydrauliques modifiés (PCC)

Afin d'améliorer la liaison entre le mortier de réparation et le support, il est conseillé de prévoir l'application d'un produit d'adhérence à base de liant hydraulique modifié (PCC) sauf s'il s'agit de mortiers ou béton mis en place par projection. En l'absence de mise en œuvre d'un primaire, le support doit être humidifié mais sans excès (le support doit présenter un aspect sombre et mat et non brillant).

La fiche technique du fabricant fixe les délais de mise en œuvre des produits après malaxage. Tout mortier ou béton qui n'a pas été mis en place dans les délais doit être rejeté.

Les coffrages éventuellement mis en place doivent être dimensionnés et fixés de telle façon qu'ils ne puissent être à l'origine de fissuration ou de décohésion préjudiciable.

Dans tous les cas, il faut procéder à une cure soignée pour limiter au maximum la dessiccation et le fissuration du plan de reprise.

4.3.3.2.1.3 Mise en œuvre des produits à base de résines synthétiques (PC)

> Il est rappelé que les produits de type «PC», qui ont des caractéristiques différentes de celles du béton support et n'apportent aucun alcalin passivant, sont utilisés lorsque les deux autres types de produits ne peuvent être mis en œuvre. Par exemple, en cas de :

- réparations locales sous l'eau ;
- nécessité d'une forte résistance aux agressions chimiques ;
- nécessité d'une très forte résistance à l'abrasion ;
- nécessité d'une très forte adhérence ;
- nécessité d'une montée en résistance très rapide ;
- mise en œuvre d'une cure impossible…

Lorsque le subjectile est très poreux ou pauvre en liant ou lorsqu'il y a incompatibilité entre le produit rapporté et le subjectile, une couche d'accrochage doit être appliquée. Sa nature doit apporter la compatibilité avec le support et avec le produit rapporté. Le plus souvent, les notices techniques conseillent la mise en œuvre d'une couche d'accrochage sur le support. L'application de certains produits sur un support ruisselant est déconseillée.

La mise en œuvre des mortiers et bétons à base de résines synthétiques fait appel à un personnel d'exécution spécialement formé et qualifié pour l'emploi des résines.

La fiche technique du fabricant doit donner les valeurs de la durée pratique d'utilisation (DPU) des produits en fonction de la température initiale des composants et de la température du support. Il faut savoir que les réactions de polymérisation sont exothermiques (elles dégagent de la chaleur) et sont d'autant plus rapides que la température est plus grande (la chaleur est, en général, facteur d'accélération et le froid facteur de ralentissement).

Si le produit doit être mis en place dans un coffrage, il faut s'assurer que la résine (composant du mélange) ne risque pas d'adhérer au coffrage et prendre, si nécessaire, les mesures adéquates, par exemple en plaquant sur le coffrage un film isolant (en polyéthylène, par exemple).

Il faut aussi s'assurer que ce coffrage est suffisamment raide et bien fixé pour qu'aucun mouvement ne puisse provoquer de fissuration interne ou de décohésion du mortier ou béton de reprise.

Lorsque le produit est mis en place en plusieurs couches successives, il faut attendre le durcissement de la couche précédente et procéder à un nouveau traitement de surface pour obtenir l'adhérence nécessaire entre les couches.

4.3.3.2.2 Application manuelle ou mécanisée des produits et systèmes de réparation des bétons en faibles épaisseurs

La faible épaisseur correspond normalement à la réalisation d'une seule couche, sauf si la mise en place se fait par projection avec une finition talochée.

4.3.3.2.2.1 Cas des applications manuelles

Un traitement des armatures ayant subit une corrosion est le plus souvent nécessaire avant la mise en œuvre des produits et systèmes (se reporter à l'article 4.3.3.4 ci-dessous).

La mise en place **des produits et systèmes à base de résines de synthèse** se fait manuellement.

Photo n° 120 : mise en place de mortier de réparation à la truelle

La mise en place des produits et systèmes sous forme de mortiers est réalisée classiquement à **la truelle** en serrant fortement pour éviter les bulles d'air et obtenir ainsi une bonne adhérence. Pour le dressage des arêtes, **une règle** peut être utilisée.

La mise en place d'un coffrage peut faciliter la mise en place et le serrage du produit comme le montre la figure qui suit sur la réfection de l'about d'une dalle.

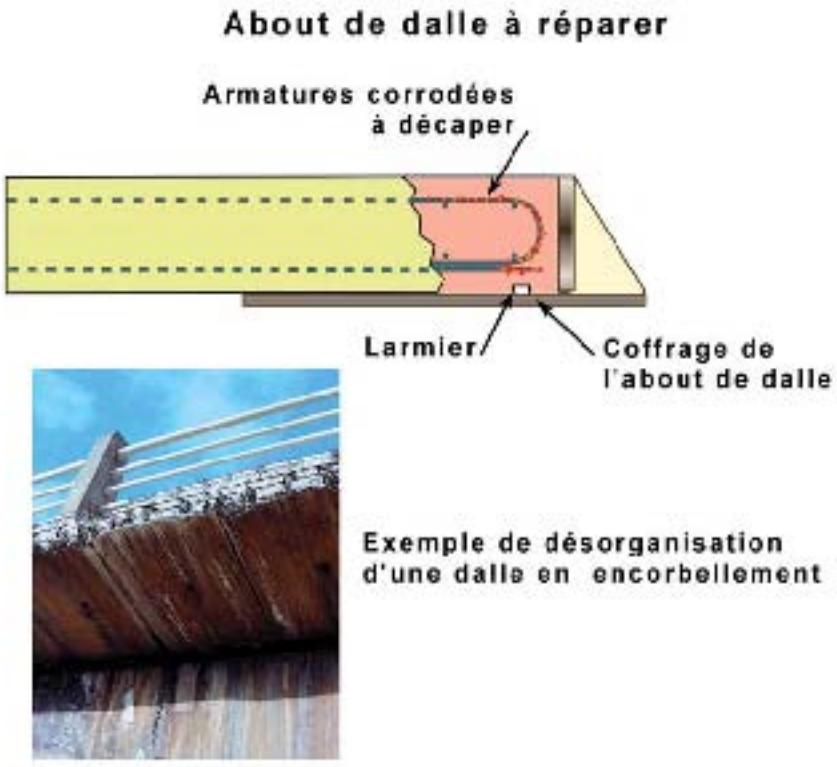


Figure n° 35 : principe de coffrage pour la réparation de l'about d'une dalle en encorbellement

La finition des produits et systèmes à base de liants hydrauliques modifiés ou non est effectuée suivant l'aspect recherché à l'aide d'une taloche en plastique rigide, d'une taloche éponge, d'une taloche métallique, d'un bloc de polystyrène ou d'une lisseuse en acier inoxydable… (cf. le **GUIDE n°4 [FABEM]**).

La finition des produits et systèmes à base de liants de liants organiques est effectuée avec une lisseuse en acier inoxydable.

Photo n° 121 : mise en œuvre d'un mortier autonivelant (crédit photo SIKA)

Sur les surfaces horizontales, lorsqu'un **produit autonivelant** est utilisé, **le réglage de l'épaisseur** est obtenu par **des plots** matérialisant l'épaisseur de la couche à réaliser (les plots doivent être enlevés avant la prise du mortier) **et le passage d'une raclette d'égalisation ou une truelle** (dans les angles). Pour l'évacuation des bulles **on utilise un rouleau débulleur et égalisateur.**

Dans le cas d'utilisation d'un mortier de consistance normale, celui-ci est tiré **à la règle** et la finition se fait à **la taloche.**

Rappel, après la mise en place des produits et systèmes à base de liants hydrauliques, une cure est indispensable.

4.3.3.2.2.2 Cas des applications mécanisées

Les produits et systèmes à mettre en place sur des surfaces importantes sont, en général, à base de liants hydrauliques modifiés ou non. Le mortier ou micro-béton (le plus souvent prêts à l'emploi) à mettre en œuvre a pour but de reconstituer l'enrobage des armatures de la structure. **La mise en place des produits se fait par projection** (se reporter au **GUIDE N°4 [FABEM] et au GUIDE N°5 [FABEM]**) :

- par la voie mouillée, suivant les quantités à mettre en place, au moyen d'un pistolet à pot de projection ou d'une pompe à mortier ;
- par voie sèche, au moyen d'une machine à projeter et d'une lance de projection.

Si la surface totale de l'élément est traitée et si l'épaisseur de la couche de mortier ou béton mise en place est homogène et suffisante pour reconstituer l'enrobage, il n'est pas nécessaire de traiter les armatures avant la projection par voie humide, mais c'est souhaitable s'il y eu corrosion.

ATTENTION, *la projection par voie sèche est incompatible avec la mise en place d'un revêtement sur les armatures ou d'un gobetis d'accrochage sur le béton.*

> Le réglage de l'épaisseur de la couche mise en place peut être obtenu au moyen :

- de coffrages matérialisant le coffrage de la pièce à restaurer ;
- d'une règle s'appuyant sur des guides.

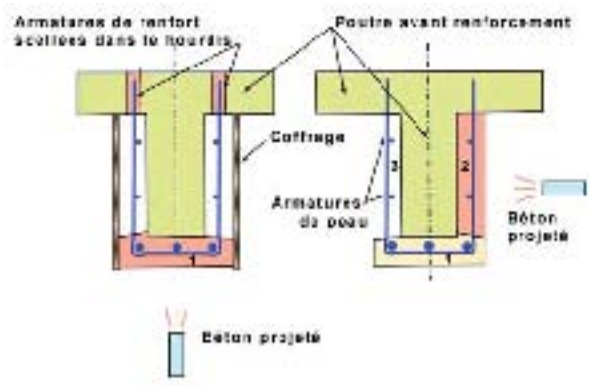


Figure n° 36 : principes à appliquer pour la réparation d'une poutre par béton ou mortier projeté

Le mortier ou le micro-béton ainsi mis en œuvre peut être laissé **brut de projection ou dressé à la règle** avec précautions pour ne pas rompre la cohésion du matériau. **Une finition talochée** nécessite en voie sèche comme en voie humide **la projection d'une couche de finition** de faible épaisseur (< 2 cm) après durcissement de la couche précédente.

Le GUIDE N°5 [FABEM] détaille les règles de l'art à mettre en œuvre lors d'une projection pour obtenir une réparation durable.

Rappel, après la mise en place des produits et systèmes à base de liants hydrauliques, une cure est indispensable.

4.3.3.2.3 Application manuelle ou mécanisée des produits et systèmes de réparation ou de renforcement des bétons en fortes épaisseurs

Compte tenu du coefficient de dilatation thermique élevé des produits et systèmes à base de résines synthétiques, il est préférable d'utiliser des produits à base de liants hydrauliques.

Lorsque les réparations sont localisées et de **faible importance en surface et volume,** les produits et systèmes sont mis en œuvre **manuellement et il est fait appel à des produits prêts à l'emploi.** Dans le cas contraire, **la mise en œuvre est plus ou moins mécanisée** et il est possible d'utiliser des produits et systèmes prêts à l'emploi ou fabriqués sur le chantier.

4.3.3.2.3.1 Cas des applications manuelles

Un traitement des armatures est le plus souvent nécessaire avant la mise en œuvre des produits et systèmes (se reporter à l'article 4.3.3.4 ci-après).

La mise en place des produits et systèmes, sous forme de mortiers ou de micro-bétons, est réalisée, comme dans le cas précédent traité dans l'article 4.3.3.2.2 ci-dessus, classiquement **à la truelle** en serrant fortement pour éviter les bulles d'air et obtenir ainsi une bonne adhérence. La mise en place s'effectue ici en plusieurs passes et en respectant l'épaisseur des couches en fonction de la position du support, ainsi que le délai entre les couches. Pour le dressage des arêtes, **une règle** peut être utilisée.

Rappel, en cas d'utilisation de produits et systèmes à base de résines synthétiques, une préparation de surface est à effectuer entre les couches successives avec mise en œuvre d'une couche d'accrochage.

Comme dans le cas précédent, **des coffrages** peuvent être utilisés, **la finition** est réalisée avec les mêmes outils et, sur les surfaces horizontales, il est également possible d'utiliser des produits autolissants.

Rappel, après la mise en place des produits et systèmes à base de liants hydrauliques, une cure est indispensable.

Après durcissement du produit ou système, **l'injection de l'interface** entre le support ou le produit ou système de réparation peut être nécessaire. Se reporter à l'article 4.3.3.3 ci-dessous.

4.3.3.2.3.2 Cas des applications mécanisées

Une telle opération, le plus souvent, a lieu dans le cadre d'un renforcement structural. Il est donc nécessaire, avant de procéder à la mise en place du produit ou systèmes, de réaliser des opérations connexes décrites dans l'article 4.3.3.3 ci-dessous.

Un traitement des armatures ayant été soumises à la corrosion est le plus souvent nécessaire avant la mise en œuvre des produits et systèmes, sauf dans le cas de la mise en place d'un mortier ou béton par projection par voie sèche.

> La mise en place des produits et systèmes sous forme de micro-bétons ou de bétons peut être réalisée au moyen de plusieurs techniques :

- **par bétonnage classique** dans des coffrages, sous réserve que le coulage gravitaire soit possible (la création de cheminées de bétonnage au travers de la structure est parfois nécessaire). Le bétonnage se fait en respectant les règles de l'art, soit **du DTU 21**,100 soit **du fascicule 65A** pour éviter la ségrégation, le ressuage et les fuites de laitance. Les micro-bétons et les bétons doivent être vibrés et leur surface supérieure est dressée à la règle et talochée **(les BAP ne doivent ni vibrés ni talochés) ;**

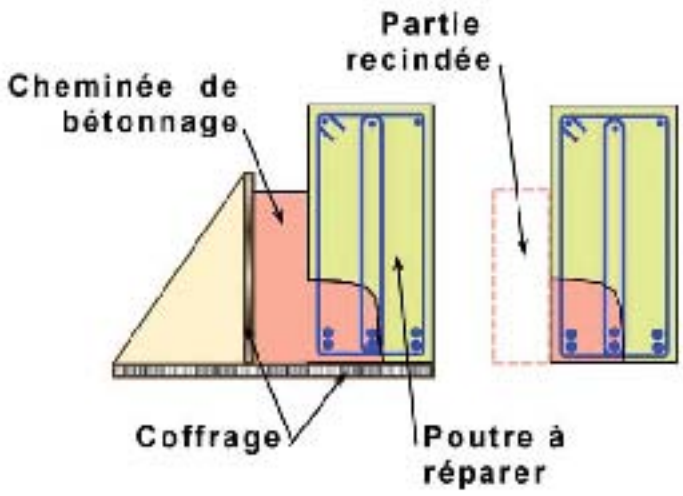


Figure n° 37 : principe de la cheminée de bétonnage pour la réparation d'une poutre

- **par injection** (coulis, mortiers ou micro-bétons) **dans des coffrages étanches** mais munis d'évents pour l'évacuation de l'air. Les coffrages peuvent être remplis de granulats pour obtenir un véritable béton. L'injection peut se faire :

  - soit par simple gravité au moyen d'une pompe à mortier ou béton,

  - soit sous pression au moyen d'une presse d'injection adaptée à la granulométrie du produit ;

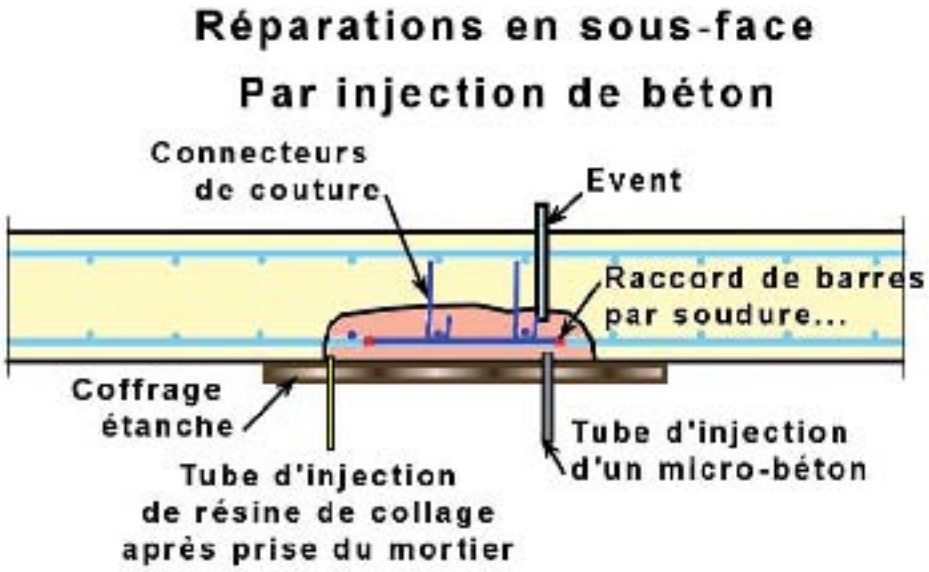


Figure n° 38 : principe de réparation par injection d'un mortier ou d'un micro-béton

- **par projection en voie mouillée** à l'aide d'une machine de projection adaptée aux volumes à mettre en place ;

- **par projection en voie sèche** au moyen d'une machine à projeter et d'une lance de projection.

Les techniques d'injection et de projection sont bien adaptées pour la mise en œuvre d'un béton en sous-face d'une structure. Le mortier ou le micro-béton mis en œuvre par projection peut être laissé **brut de projection ou dressé à la règle** avec précautions pour ne pas rompre la cohésion du matériau. **La couche qui vient d'être projeté peut être dressée à la règle avec précautions puis, après durcissement, subir un nettoyage avant la projection de la couche suivante.**

Une finition talochée nécessite en voie sèche comme en voie humide **la projection d'une couche de finition** de faible épaisseur (< 2 cm) après durcissement de la couche précédente.

La norme NF EN 14487-2[55] relative à l'exécution du béton projeté et le **GUIDE N°5 [FABEM]** détaillent les règles de l'art à mettre en œuvre lors d'une projection pour obtenir une réparation ou un renforcement durable.

[55] *Les différents **fascicules ASQUAPRO,** disponibles sur le site : www.asquapro.asso.fr; complètent la norme européenne sur la mise en œuvre, le contrôle, l'hygiène et la sécurité.*

Rappel, après la mise en place des produits et systèmes à base de liants hydrauliques, une cure est indispensable.

Après durcissement du produit ou système, **l'injection de l'interface** entre le support ou le produit ou système de réparation est très souvent nécessaire, une fissure se formant à cet endroit sous les effets des retraits. Se reporter à l'article 4.3.3.3 ci-dessous.

4.3.3.3 Réalisation d'une opération de renforcement structural

4.3.3.3.1 Généralités

La réalisation d'un renforcement structural fait en premier lieu appel à l'ajout de mortier ou béton, en général, en forte épaisseur. Il s'agit des techniques de mise en œuvre décrites dans l'article 4.3.3.2 ci-dessus. Il n'est donc pas nécessaire de les décrire de nouveau.

Rappel, comme dans le cas de la restauration, il faut prendre des mesures pour limiter les effets des vibrations éventuelles, d'autant que les épaisseurs mises en œuvre sont importantes.

La grande différence avec une réparation simple est qu'il est impératif **de faire participer le béton ainsi ajouté à la reprise des efforts appliqués à la structure.** Cette exigence peut imposer la mise en œuvre d'opérations complémentaires, soit pendant les travaux, soit dès que le béton ajouté a atteint une résistance suffisante.

La technique à mettre en œuvre pour assurer cette participation fait partie du projet du renforcement. Le détail de son exécution est proposé par l'entrepreneur à l'acceptation du maître d'œuvre.

Pour permettre au béton ajouté de bien jouer son rôle, des opérations connexes sont souvent indispensables. Il s'agit de la réalisation **des opérations listées ci-après et détaillées dans la suite du présent article** ou dans les documents auxquels il est fait référence :

- une mise sur cintre de la structure ;
- le collage entre le béton ou le mortier frais et le béton support ;
- l'injection de l'interface entre le produit de réparation ou de renforcement et le béton support ;
- l'injection des fissures ou des vides du béton de la structure ;
- le calage de certains éléments d'une structure ;
- la mise en place d'armatures passives additionnelles ;
- le scellement d'armatures passives additionnelles dans le béton de la structure ;

- le collage d'armatures additionnelles sur le béton de la structure (plaques métalliques, plaques ou tissus de composites) ;
- l'ajout de forces par une précontrainte additionnelle ;
- l'ajout de forces par vérinage…

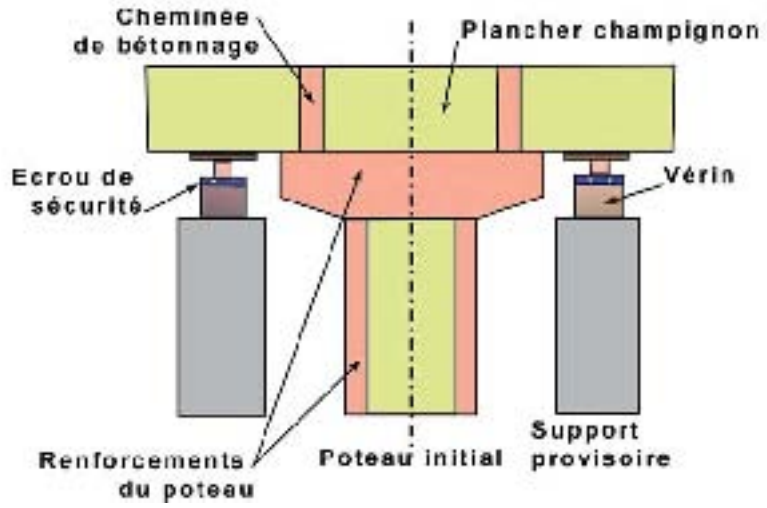


Figure n° 39 : principe de renforcement, vis-à-vis des charges permanentes et d'exploitation d'un poteau support d'un plancher-champignon

Rappel : si un revêtement (ou une barbotine) est appliqué sur les armatures, le mortier (ou le béton) de restauration doit être mis en œuvre en respectant le délai d'utilisation prévu par la notice d'emploi du produit de revêtement (pour une barbotine, avant la fin de prise de celle-ci).

4.3.3.3.2 Réalisation d'un collage structural de bétons

4.3.3.3.2.1 Réalisation d'un collage béton durci sur béton durci

Ce type de collage peut être utilisé pour assembler un élément de béton sur une structure (par exemple, un dé d'appui sous le talon d'une poutre) ou un gros éclat de béton tombé d'une structure sous l'action d'un choc, à condition que le morceau de béton récupéré soit entier…

Les produits et systèmes à utiliser sont à base de résines synthétiques à deux composants. Les résines peuvent être pures ou thixotropes suivant le type de collage à effectuer.

Les produits et systèmes de collage prêts à l'emploi et conformes à la norme **NF EN 1504-4** doivent être mis en œuvre en respectant les exigences de **la fiche technique du fabricant.**

Les surfaces des deux éléments à assembler sont encollées par la technique du double collage, soit en couche mince (produits non thixotropes) à la brosse, au rouleau, voire au pistolet pulvérisateur, soit en couche plus épaisse (produits thixotropes) à la spatule, à la truelle, au peigne cranté, voire au gant en cas de surfaces non planes. Le support peut être sec ou légèrement humide.

Ensuite, il faut maintenir les éléments en place, par exemple à l'aide de serre-joints en comprimant le plan de collage pour faire baver la colle (pression de 0,05 à 0,1 MPa). L'épaisseur du film de colle doit être la plus mince possible pour limiter le fluage de la colle durcie par temps chaud une fois l'ouvrage en service. Les coulures de colle doivent être nettoyées.

Lorsque la longueur de l'assemblage est importante, il y a lieu de tenir compte des phénomènes de dilatation différentielle entre les éléments assemblés (collage par points). Si les écarts thermiques sont importants, il faut tenir compte du fait que la colle a un coefficient de dilatation supérieur à celui du béton de la pièce à assembler

4.3.3.3.2.2 Réalisation d'un collage béton frais sur béton durci

Les produits et systèmes de collage prêts à l'emploi et conformes à la norme **NF EN 1504-4** doivent être mis en œuvre en respectant les exigences de **la fiche technique du fabricant.**

Les colles utilisées sont, soit pures, soit thixotropes. Le support peut être sec ou légèrement humide. Il est encollé avec les mêmes outils que lors d'un collage béton durci sur béton durci.

Lorsque la couche de béton ajoutée est armée, cela impose, le plus souvent, une liaison entre les deux bétons sous forme d'armatures de coutures (reprise de bétonnage classique avec collage) ou de simples connecteurs (cas du béton contrecollé). L'importance du ferraillage rend délicate la mise en place de la colle, car seul le béton doit être encollé.

Dans un tel cas, lorsque la surface à renforcer est importante, compte tenu de la faible durée d'utilisation des produits de collage, il faut travailler par plots successifs.

L'épaisseur de colle à mettre en place est normalement de l'ordre de 2 mm soit de l'ordre de 2 à 3 kg/m^2 de colle.

4.3.3.3.3 Réalisation d'une injection de l'interface entre le produit de réparation ou de renforcement et le béton support

> Une telle injection est nécessaire, par exemple, dans les cas suivants :

- mise en place de mortier ou béton en sous face d'une structure ;
- pièce bétonnée de volume important (par exemple, création d'un massif d'ancrage dans une opération de mise en œuvre d'une précontrainte additionnelle) ;
- bétonnage d'un élément lié à une structure soumise à des vibrations…

Les produits et systèmes d'injection du béton conformes à la norme **NF EN 1504-5** doivent être mis en œuvre en respectant les exigences de **la fiche technique du fabricant.**

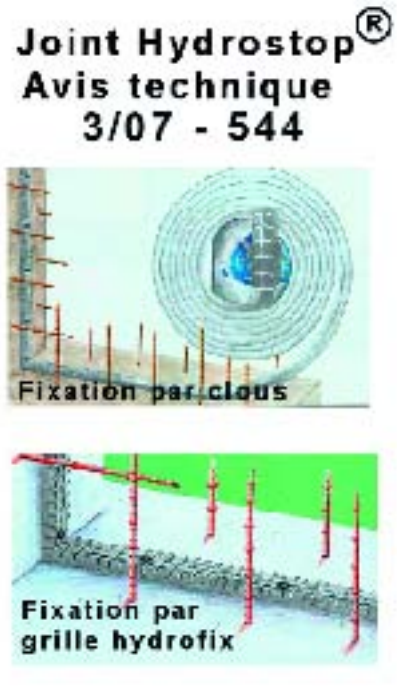


Figure n° 40 : joint hydro-expansif assurant l'étanchéité d'une reprise de bétonnage (crédit-photo SNAAM)

Il existe des systèmes permettant de rendre étanche une reprise de bétonnage (par exemple, entre le radier et le voile d'un réservoir). Ces dispositifs, bien adaptés aux reprises de bétonnage longilignes, sont à mettre en place dans le plan de la reprise avant bétonnage de l'élément de renfort.

L'injection de l'interface entre la réparation et le béton de la structure peut se faire par l'intermédiaire d'évents mis en place avant le bétonnage (par exemple, lors d'un bétonnage en sous face).

L'injection peut aussi se faire classiquement après durcissement du béton ajouté à la structure en équipant le périmètre de la reprise de bétonnage d'injecteurs.

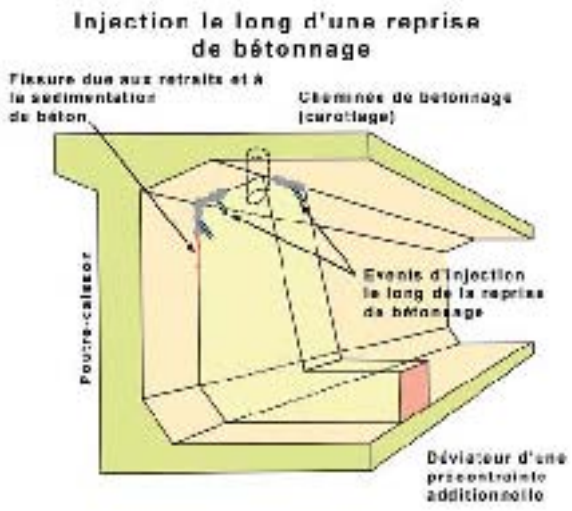


Figure n° 41 : principe de réalisation de l'injection de la périphérie d'une reprise de bétonnage

La réalisation de l'injection est détaillée dans le **GUIDE N°3 [FABEM]** auquel le lecteur est invité à se reporter.

4.3.3.3.4 Réalisation d'une injection ou d'un remplissage de fissures ou de vides du béton

Les produits et systèmes d'injection du béton prêts à l'emploi et conformes à la norme **NF EN 1504-5** doivent être mis en œuvre en respectant les exigences de **la fiche technique du fabricant.**

La réalisation d'une telle injection est détaillée dans le **GUIDE N°3 [FABEM]** auquel le lecteur est invité à se reporter.

4.3.3.3.5 Réalisation de scellements d'armatures de béton armé

Les produits et systèmes d'ancrage et de scellement prêts à l'emploi et conformes à la norme **NF EN 1504-6** doivent être mis en œuvre en respectant les exigences de **la fiche technique du fabricant.**

Dans le cas de scellement verticaux sur une paroi horizontale ou faiblement inclinée, le produit sous forme **d'un coulis fluide** peut être mis en place par simple gravité.

Si le scellement concerne une paroi verticale ou une sous-face, le produit sous forme **d'un mortier à consistance ferme** est mis en place manuellement avec **une truelle** et serré dans le trou avec **un matoir** (tige en métal ou en bois de diamètre adapté), ou mieux, **avec un pistolet manuel ou pneumatique** prévu pour cet usage. Les produits de scellement prêts à l'emploi sont disponibles dans des cartouches ou des ampoules, ce qui facilite leur mise en œuvre.

Les barres doivent être impérativement maintenues pendant le durcissement du produit de scellement.

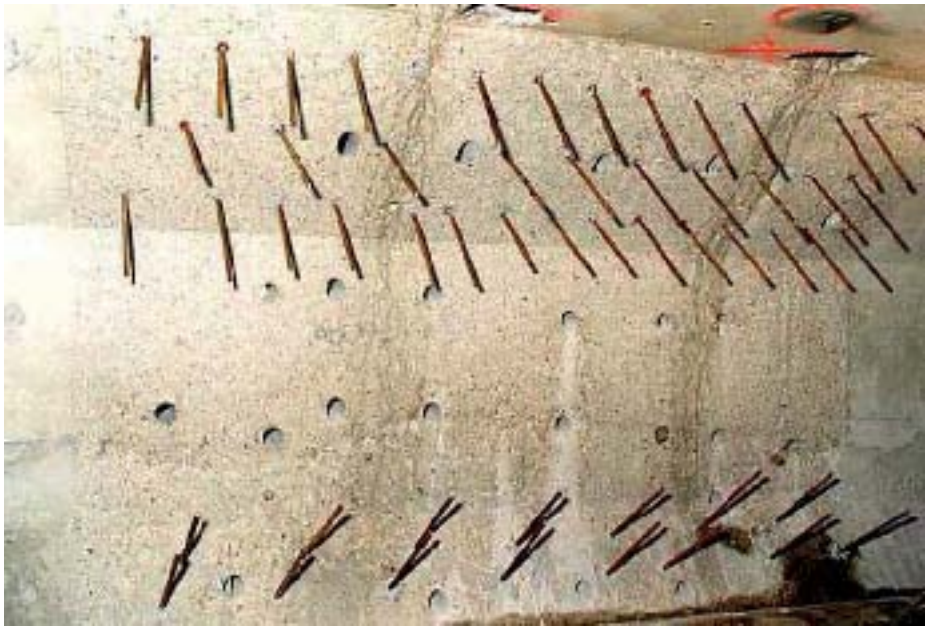


Photo n° 122 : barres scellées au pont de Châlons-en-Champagne (crédit photo D. Poineau)

La réalisation d'un tel scellement est détaillée dans le **GUIDE N°7 [FABEM].**

4.3.3.3.6 Réalisation de calages d'éléments

Les produits et systèmes de calage prêts à l'emploi et conformes aux normes **XP P 18-821 et XP P 18-822** doivent être mis en œuvre en respectant les exigences de **la fiche technique du fabricant.**

Les trois techniques principales décrites ci-après peuvent être utilisées pour réaliser un calage. Les produits et systèmes utilisés doivent être «à retrait compensé».

Il est rappelé que la mise en place d'un primaire d'accrochage est nécessaire pour les produits et systèmes à base de résines de synthèse. Si cette mise en œuvre est trop difficile, il est préférable de choisir un produit à base de liants hydrauliques.

Première technique : couler un mortier ou un coulis fluide gravitairement en veillant bien à ne pas emprisonner de bulles d'air à l'interface entre les éléments à caler et le produit ou le système de calage. Lorsque l'épaisseur du calage est importante, pour réduire les effets du fluage du matériau (surtout s'il est à base de résines synthétiques), il faut incorporer des gravillons de granulométrie adaptée pour réaliser un véritable béton.

Deuxième technique : injecter un mortier ou un coulis fluide dans un coffrage étanche dans lequel il est possible de disposer des gravillons pour obtenir au final un béton. Il faut mettre en place des évents pour permettre à l'air de s'échapper du coffrage.

Troisième technique : remplir l'espace entre les deux éléments à caler avec un mortier sec. Ce mortier doit être serré avec un matoir. Une telle opération ne peut être effectuée que par un personnel spécialisé.

4.3.3.3.7 Réalisation de la mise en place d'armatures passives additionnelles internes au béton

Les armatures sous forme de treillis, cages d'armatures ou barres isolées sont mise en place d'une façon traditionnelle en respectant les exigences, soit **du DTU 21,** soit **du fascicule 65A** et, en particulier, **le respect des longueurs de recouvrement et des enrobages.**

Les armatures transversales (épingles, étriers et cadres) doivent être reconstituées pour entourer les nouvelles barres principales.

> Dans certains cas, il peut être fait appel, pour rallonger les barres trop courtes, à l'utilisation :

- de **manchons de jonction** (Cf. les normes **NF A 35-020-1 et NF A 35 020-2**, ainsi que **la Marque AFCAB-Dispositifs de raboutage ou d'ancrage d'armature**) ;
- **du soudage,** les soudures à exécuter étant de type bout à bout ou sur éclisses (Cf. **le fascicule 65A**).

Les barres mises en place, si besoin est, peuvent être scellées dans le béton de la structure à réparer ou renforcer. Se reporter à l'article 4.3.3.3.5 ci-dessus.

Les barres en acier inoxydable doivent être mises en œuvre en respectant scrupuleusement les précautions de **l'annexe n°3** du présent guide qui sont à reprendre dans **la procédure d'exécution de l'opération.**

Les barres en composites sont assemblées et mises en place en respectant les exigences de la fiche technique du fabricant, exigences qui doivent être reprises dans **la procédure d'exécution de l'opération.**

En cas d'utilisation **de barres protégées par un revêtement étanche,** toutes les précautions doivent être prises lors des manutentions pour éviter d'endommager le revêtement. Il doit être reconstitué au cas où une blessure est constatée. La méthode de traitement des endommagements du revêtement doit figurer dans **la procédure d'exécution de l'opération.**

4.3.3.3.8 Réalisation du collage d'armatures passives extérieures au béton

Le collage de plaques métalliques ou de plaques et tissus composites est réalisé en fin de travaux après réparation des zones où le béton est dégradé.

En l'absence d'une reprise du poids propre (par exemples, par un étaiement, par application d'efforts extérieurs…) ce type de renforcement ne peut reprendre que les sollicitations développées par les charges appliquées après le renforcement (charges de superstructures et charges d'exploitation).

Les produits et systèmes de collage prêts à l'emploi et conformes à la norme **NF EN 1504-4** doivent être mis en œuvre en respectant les exigences de **la fiche technique du fabricant.**

La réalisation du collage de plaque métalliques ou de plaques et de tissus composites est détaillée dans **le GUIDE N°7 [FABEM].**

4.3.3.3.9 Réalisation d'un ajout de forces par précontrainte additionnelle

Le plus souvent cette précontrainte est réalisée au moyen d'armatures de précontrainte disposées **à l'extérieur du béton de la structure** à réparer ou renforcer. Parfois, les armatures peuvent être mises en place **à l'intérieur du béton de la structure,** par exemple dans des conduits réalisés par forages, dans des rainures…

La réalisation d'une telle opération est très complexe. Elle est détaillée dans le **GUIDE N°8 [FABEM].**

Photo n° 123 : massif d'ancrage de la précontrainte additionnelle au pont de Châlons-en-Champagne (crédit photo Sétra)

4.3.3.3.10 Réalisation d'un ajout de forces par déformations imposées

L'ajout de forces par déformations imposées, le plus souvent par vérinage, est une opération délicate dont les effets sont très fortement réduits par le fluage du béton qui existe quel que soit l'âge du béton. Il est plus important sur les bétons récents que sur les bétons âgés.

Pour un béton âgé de 28 jours, la force finale après fluage vaut sensiblement le tiers de la force initialement développée.

La force au moment de l'application de la déformation peut être excessive pour le béton de la structure (développement de contraintes supérieures à la contrainte limite). Dans un tel cas, la déformation doit être introduite **en plusieurs phases séparées par un intervalle de temps suffisant** (plusieurs mois) pour que les contraintes au cours de **la phase «n»** et des phases précédentes diminuent suffisamment pour que **la phase n+1** puisse être lancée.

La réalisation d'une telle opération est très complexe. Elle est détaillée dans le **GUIDE N°8 [FABEM].**

4.3.3.4 Réalisation d'une opération de restauration ou de préservation de la passivité des armatures

4.3.3.4.1 Réalisation du remplacement du béton carbonaté et/ou pollué ou de l'augmentation du recouvrement des armatures pour apporter des alcalins et/ou augmenter la résistivité du béton

Le remplacement du béton carbonaté ou pollué **par un produit ou systèmes à base de liants hydrauliques restaure leur passivité.**

> Rappel : pour que le traitement soit pleinement efficace, il faut éviter le risque d'inversion de polarité (se reporter à l'article 4.2.1.2.3 ci-dessus), ce qui impose que :

- la purge du béton soit complète et, qu'après celle-ci, un contrôle électrochimique du support béton soit effectué (pH, teneur en polluants…) avant la mise en œuvre du produit ou du système de remplacement ;
- les armatures soient débarrassées de la rouille et reçoivent un revêtement anticorrosion ;
- la totalité de la surface de la structure soit traitée pour avoir une teneur en alcalins homogène ;
- l'épaisseur du recouvrement des armatures soit augmenté ;
- un revêtement de protection complète la réparation.

L'augmentation du pH du béton par diffusion peut être obtenue par la mise en œuvre **d'un recouvrement à base de liants hydrauliques** appliqué sur toute la surface du béton. Ce recouvrement participe aussi à **l'augmentation de la résistivité du béton.**

La réalisation de ces deux opérations fait, en premier lieu, appel à l'ajout de mortier ou béton, c'est-à-dire **aux techniques de mise en œuvre décrites dans l'article 4.3.3.2 ci-dessus.** Il n'est donc pas nécessaire de les développer de nouveau.

4.3.3.4.2 Réalisation d'un traitement électrochimique de ré-alcalinisation

Le présent article expose dans le détail la **ré-alcalinisation d'un béton carbonaté par courant imposé.** Il est applicable, à quelques détails près, à une déminéralisation par courant imposé. Il existe aussi des procédés faisant appel à **des anodes sacrificielles.**

Ces divers procédés par courant imposé ou par anodes sacrificielles étant, à ce jour, brevetés, l'opération doit se dérouler conformément à **la fiche technique de l'applicateur.** Il convient de s'assurer que cette fiche respecte les exigences du fascicule de documentation **FD CEN/TS 14038-1.**

Les indications fournies par le fascicule de documentation ont été complétées sur certains points comme les valeurs des résistances offertes par les circuits réalisés…

L'entrepreneur doit proposer à l'acceptation **du maître d'œuvre une procédure** de réalisation de l'opération adaptée au procédé de ré-alcalinisation basée sur l'architecture des phases développées ci-dessous.

Rappel, la ré-alcalinisation n'est pas applicable aux structures précontraintes, aux armatures de béton armé revêtues d'un revêtement étanches. En sus, en cas de pollution par les chlorures, il faut les extraire avant d'envisager la ré-alcalinisation.

> Une ré-alcalinisation comprend quatre phases pendant lesquelles doivent être exécutées un certain nombre d'opérations :

1. opérations préalables (rappels) :

- vérification qu'une alcali-réaction ne risque pas d'affecter le béton compte tenu de l'ajout d'alcalins dans la solution électrolytique (en cas de risque il faut supprimer le carbonate de sodium) ;
- mesure de la profondeur de carbonatation ;
- mesure des profils de chlorures (profondeur et dosage) ;
- mesure de l'enrobage et localisation des armatures ;
- préparation de la surface du substrat ;
- enlèvement de la rouille des armatures (un décapage total n'est pas nécessaire) ;
- réparation des zones dégradées.

2. mise en place du matériel :

- vérification de la continuité des armatures par mesure de la résistance électrique entre les barres au moins tous les 10 m^2. La résistance mesurée ne doit pas dépasser 1Ω. Si la continuité n'est pas assurée dans certaines zones, il faut dégager les armatures et assurer leur connexion. Les armatures dégagées doivent ensuite être réenrobées pour éviter les courts-circuits ;
- connexion des câbles d'alimentation en provenance du générateur (couleur noire) aux armatures formant la cathode, normalement, tous les 10 m^2 (la partie située entre deux connexions est appelée «zone», soit anodique, soit cathodique) et isoler le point de contact ;

- mise en place de l'anode (treillis en titane) sur des plots non conducteurs pour l'isoler à environ 2 cm de la surface du béton et connexion de cette anode au générateur par des câbles (couleur rouge) tous les 6 à 10 m^2 ;

- enrobage par projection de l'anode dans une couche de cellulose imbibée de carbonate de sodium qui doit être en contact avec la surface du béton ;

- mise en place des dispositifs destinés à protéger la couche de cellulose de l'ensoleillement direct et du vent de façon à maintenir constante son humidité. Si besoin est, la couche de cellulose doit être réhumidifiée au cours de l'opération ;

- mise en place du générateur de courant continu (un transformateur-redresseur fournissant une tension 50 V avec un taux d'ondulation efficace inférieur à 100 mVrms sous une fréquence de 100 Hz) ;

- mesure section par section (entre deux connections) de la résistance entre les armatures et l'anode afin de vérifier l'absence de courts-circuits (la résistance mesurée doit être supérieure à 0,1MΩ). Le courant mesuré dans chaque section doit être au maximum de 4 A/m^2 (généralement entre 1 et 2 A/m^2) et la tension de 50 V ;

- mise en place d'un enregistreur destiné à mesurer en continu la puissance absorbée par l'installation (intensité et voltage) ;

- contrôle de la conformité de l'installation aux exigences de sécurité et du fonctionnement des fusibles et disjoncteurs ;

- mise en place d'une protection de la zone de traitement pour empêcher la venue d'animaux ou de personnes non autorisées, à cause des risques électriques (pour une section de 10 m^2, l'intensité transitant par les câbles d'alimentation peut atteindre entre 20 à 40 ampères).

3. réalisation de la ré-alcalinisation :

- la température sur le chantier doit être supérieure à 0°C. Il est préférable de dégager une marge de sécurité en cas de prévisions météorologiques défavorables;

- mise sous tension du système (4 A/m^2 au maximum) pour une durée minimale de traitement de 100 heures (normalement le traitement dure environ deux à trois semaines) ;

- contrôle du fonctionnement des différentes sections (tension câble d'alimentation par câble d'alimentation) ;

- réalisation d'une inspection de routine et de maintenance de l'installation au moins une fois par jour (article 8.3 du fascicule de documentation) ;

- prélèvement, durant le traitement, de carottes pour contrôler la valeur du pH. Le laboratoire chargé de ces mesures, le nombre des carottes et la fréquence de prélèvement doivent être fixés par le marché.

4. fin de l'opération :

- après démontage du matériel, enlèvement de la couche de cellulose suivi d'un rinçage soigneux du béton ;

- après séchage du substrat, une préparation de surface est à réaliser et un revêtement de protection est à mettre en œuvre pour empêcher ou limiter la pénétration du gaz carbonique. Il faut attendre environ un mois avant d'appliquer le revêtement, pour que la couche superficielle du béton soit légèrement carbonatée afin d'éviter l'attaque du revêtement par les alcalins.

4.3.3.4.3 Réalisation d'un traitement électrochimique de déminéralisation par courant imposé

Nota : *aucun document à caractère normatif ne traite de la déminéralisation (extraction des chlorures). Ce traitement étant très semblable à une ré-alcalinisation,* ***le marché*** *relatif à une déminéralisation peut donc être calqué sur celui d'une ré-alcalinisation.*

> Les limites d'emploi de la déminéralisation sont les mêmes que celles de la ré-alcalinisation. Les dispositions et le matériel nécessaire pour assurer une déminéralisation sont quasiment identiques. La déminéralisation diffère toutefois de la ré-alcalinisation sur les points suivants :

- la couche de cellulose est imbibée **d'eau de chaux ;**
- la durée de l'opération est de l'ordre de 4 à 5 semaines ;
- les mesures des profils de chlorures remplacent celles de la profondeur de carbonatation (pH). Sachant que la totalité des chlorures ne peut être extraite, il faut s'assurer que le dosage résiduel en chlorures au droit des armatures est nettement inférieur aux valeurs limites (tenir compte du fait que le profil des chlorures relevé en fin de traitement va se modifier avec le temps par diffusion) ;
- la déminéralisation doit être suivie **d'une ré-alcalinisation** et par la mise en place **d'un revêtement de protection.**

4.3.3.4.4 Réalisation d'un traitement électrochimique de prévention ou de protection cathodique

La prévention cathodique concerne les structures pour lesquelles la corrosion n'a pas encore commencé. Dans ce cas, il faut appliquer à l'interface béton /acier une petite polarisation négative (0,2 à 2 mA/m^2) qui empêche l'amorçage de la corrosion.

La protection cathodique vise à réduire la vitesse de corrosion à des valeurs négligeables par l'application d'une polarisation négative plus importante (2 à 20 mA/m^2 pour des aciers non revêtus) mais sans risquer de provoquer la formation d'hydrogène naissant.

> La norme NF EN 12696 liste les différentes installations de prévention ou de protection cathodique qu'il est possible de mettre en place. Les ensembles anodiques peuvent être :

■ à revêtements conducteurs :

- organiques,
- métalliques ;

■ en titane activé et :

- placés à la surface du béton et enrobés dans un revêtement à base de liants hydrauliques,
- encastrés dans des rainures pratiquées à la surface du béton,
- intégrés dans la structure dans des trous forés dans le béton (ou pour une construction neuve, noyés dans le béton)

L'entrepreneur propose à l'acceptation **du maître d'œuvre une procédure** de réalisation de l'opération adaptée au procédé de prévention ou de protection cathodique.

Rappel, la prévention cathodique et la protection cathodique, visées par cette norme, sont applicables aux structures en béton armé et précontraint, ainsi qu'aux armatures en acier non revêtu ou revêtues d'un revêtement organique. La norme indique qu'elle n'est pas applicable aux structures immergées ou enterrées. Dans ces cas, les techniques de prévention ou de protection des structures aériennes doivent être adaptées (se reporter à l'article 3.2.6.3.3.2 ci-dessus). La norme a un caractère exigentiel et ne donne aucune règle de dimensionnement de l'installation.

Une prévention ou une protection cathodique comprennent les différentes phases listées ci-après qu'il convient de respecter. Ce qui suit concerne la mise en place **d'une prévention ou d'une protection cathodique classique par courant imposé avec anode en titane activé enrobée d'un mortier à base de liants hydrauliques** (il convient de se reporter à la norme[56] pour les détails car, ici, la description des phases est limitée à l'essentiel; il en est de même pour les autres types d'installations).

1. opérations préalables (rappels) :

- mesure de la profondeur de carbonatation ;
- mesure des profils de chlorures (profondeur et dosage) ;
- mesure de l'enrobage et localisation des armatures ;
- contrôle et rétablissement, si besoin est, de la continuité électrique des armatures. La mesure de la résistance électrique entre les barres est à effectuer au moins tous les 10 m^2. La résistance mesurée ne doit pas dépasser 1Ω. Si la continuité n'est pas assurée dans certaines zones, il faut dégager les armatures et assurer leur connexion. Les armatures dégagées doivent ensuite être réenrobées pour éviter les courts-circuits ;

[56] La réalisation d'une prévention ou d'une protection cathodique impose de faire un projet avec l'assistance de spécialistes. Ce projet servira à préparer la consultation des entreprises spécialisées, à en dépouiller les résultats et à mettre au point la réalisation

- mesure du potentiel d'électrode acier/béton par carrés de moins de 500 mm de côté (il n'est pas nécessaire de traiter toute la surface de la structure, il faut choisir des zones de mesures représentatives) ;

- détection des zones où la corrosion est probablement active (réparation à prévoir) ;

- vérification de l'homogénéité de la résistivité électrique du béton de la structure ;

- préparation de la surface du béton ;

- enlèvement de la rouille des armatures (un décapage total n'est pas nécessaire) ;

- réparation des zones dégradées mais sans mettre de primaire sur les armatures (le produit de réparation doit avoir une résistivité ne dépassant de plus de 50 à 200% celle du béton de la structure).

2. mise en place du matériel :

Une telle installation doit avoir une durée de vie de plusieurs dizaines d'années. Elle doit être conçue pour un tel usage.

- réalisation de la connexion des câbles d'alimentation en provenance du générateur (couleur noire et de 1 mm^2 de section) aux armatures formant la cathode, normalement, tous les 10m^2, avec isolation des différents points de contact ;

- mise en place de l'anode (treillis en titane) sur des plots non conducteurs pour l'isoler de la surface du béton, connexion de cette anode au générateur par des câbles (couleur rouge et de 1 mm^2 de section) tous les 6 à 10 m^2 ;

- mise en place **des capteurs de surveillance permanents et des jonctions fixes, des capteurs mobiles des différentes zones** (électrodes de références permanentes[57] et portatives, sondes de polarisation, éprouvettes et sondes macro-piles…). Les câbles de surveillance ont une section de 0,5 mm^2, ils sont de couleur bleue pour les électrodes et de couleur jaune pour les autres capteurs) ;

- réalisation de l'enrobage de l'anode par un mortier à base de liants hydrauliques conforme à la norme **NF EN 1504-3** et **non conducteur. Les caractéristiques de résistance et de résistivité** de ce mortier doivent être proches de celles du béton de la structure (résistivité ne dépassant pas 50 à 200% celle du béton de la structure. L'article 5.11 de la norme précise que les 200% peuvent être dépassés [maximum 100 kΩ] mais sous la condition que l'anode ainsi enrobée puisse assurer la circulation du courant nominal maximal à la tension prévue. L'adhérence moyenne doit être supérieure à 1,5 MPa et la minimale à 1 MPa ;

- une cure doit être appliquée au mortier d'enrobage. De plus, avant de mettre en tension l'installation, il faut attendre son durcissement et l'évaporation de l'eau en excès (article 7.6 de la norme) ;

- mise en place de l'instrumentation de surveillance (voltmètres et ampèremètres aptes à satisfaire la précision des mesures de l'article 6.4.2 de la norme) et de la ou des centrales de mesure portables et permanentes (article 6.4.3 de la norme) ;

[57] *Électrodes à double jonction de gel argent/chlorure d'argent/0,5M de chlorure de potassium (Ag/AgCl/0,5 M KCl) ou manganèse/dioxyde de manganèse/0,5 M d'hydroxyde de potassium (Mn/MnO_2/0,5 M NaOH).*

- mise en place du **système de gestion des données** (article 6.5 de la norme), qui va recueillir, trier et transmettre les informations au service chargé de la gestion et du contrôle de l'installation. Ce système doit pouvoir lancer une alerte lorsque l'installation n'assure plus correctement la protection des armatures (protection excessive, activité de corrosion…) ;

- mise en place du générateur de courant continu (un transformateur-redresseur fournissant une tension 50 V avec un taux d'ondulation efficace inférieur à 100 mVrms sous une fréquence de 100 Hz). **Attention,** pour les systèmes où l'anode n'est pas enrobée (cas des recouvrements conducteurs), la tension d'alimentation est à réduire à 24 volts) ;

3. essais en cours d'installation :

- contrôle de la polarité de tous les circuits ;

- mesure de la continuité de tous les circuits. Les résistances mesurées doivent être conformes aux valeurs calculées (10% du maximum) ;

- mesure, zone par zone (entre deux connections), de la résistance entre les armatures et l'anode afin de vérifier l'absence de courts-circuits ;

- contrôle du dispositif d'alimentation électrique à partir du réseau de façon à s'assurer que l'installation est conforme aux exigences de sécurité et que les fusibles et disjoncteurs fonctionnent parfaitement ;

- inspection visuelle de l'ensemble de l'installation ;

4. mise en service de l'installation :

- des mesures sont à réaliser avant la mise sous tension (article 8.2 de la norme) :

. potentiel acier/béton par rapport à toutes les électrodes permanentes et aux capteurs de polarisation,

. potentiel acier/béton par rapport à toutes les électrodes portables aux emplacements prévus lors de la conception,

. potentiel acier/béton par rapport à l'ensemble anodique,

. données des autres capteurs,

. fonctionnement du système d'acquisition et de transmission des données ;

- mise sous tension avec un faible courant (10 à 20% de la capacité de l'installation) combinée aux mesures suivantes :

. potentiel acier/béton par rapport à toutes les électrodes permanentes et portables,

. tension de sorties et intensités débitées,

Les polarités mesurées doivent être conformes à celles prévues. Les potentiels acier/béton doivent se décaler négativement par rapport aux valeurs mesurées avant la mise en tension.

- pendant une durée d'une à quatre semaines, réglage initial de l'installation avec un niveau de tension permettant d'obtenir les objectifs souhaités (soit une baisse rapide du potentiel de 200 à 300 mV, soit une polarisation lente [courant faible]) ;

- à la fin du réglage, il faut procéder à une évaluation de la performance initiale de l'installation qui porte sur les points suivants :

. mesure de la tension et de l'intensité du courant de toutes les zones et détermination par le calcul de la résistance du circuit,

. mesure des potentiels instantanés à courant coupé (entre 0,1 et 0,5 seconde après la coupure) au niveau des électrodes permanentes,

. mesure de la dépolarisation après coupure permanente du courant (durée des mesures entre 4 et 25 heures),

. mesures des données fournies par les autres capteurs du système de surveillance,

. mesures du potentiel acier/béton sous alimentation en courant, si demandé.

Les résultats des mesures au cours de l'évaluation doivent respecter les limites suivantes :

- aucun potentiel à courant coupé inférieur à **-1 100 mV pour les armatures passives et -900 mV pour les armatures actives**[58] (électrode Ag/AgCl/0,5 M KCl),

- potentiel instantané à courant coupé (entre 0,1 et 1 seconde) inférieur à -720 mV,

- décroissance du potentiel pendant une période maximale de 24 heures d'au moins 100 mV après la coupure,

- décroissance du potentiel pendant une longue période (plus de 24 heures) d'au moins 150 mV après la coupure.

- si les résultats de l'évaluation ne sont pas conformes, un réglage doit être opéré et une nouvelle évaluation entreprise au bout de 28 jours ;

5. enregistrement et documentation sur l'installation :

- **un rapport** sur la mise en place et la mise en service doit être rédigé (voir l'article 9.2 de la norme) ;

- **un manuel** de fonctionnement et de maintenance doit être établi sous le contrôle du spécialiste fixant, entre autre, la périodicité des opérations de contrôle et de maintenance (article 9.3 de la norme) ;

6. Exploitation et maintenance :

Normalement, les dispositifs de recueil et de transmission des données (avec seuils d'alerte) limitent les interventions sur le site. Des inspections de routines sont cependant nécessaires ainsi qu'un suivi, au moins une fois l'an, de l'installation.

- la consistance des inspections de routine est donnée dans l'article 10.1 de la norme;

- la consistance du suivi annuel est donnée par l'article 10.2 de la norme, un rapport est à établir à cette occasion.

[58] *Risque de fragilisation par l'hydrogène naissant (voir le diagramme).*

4.3.3.4.5 Réalisation d'un revêtement actif sur des armatures de béton armé

Les armatures doivent avoir été débarrassées de toute trace de corrosion au degré Sa2. Dès que l'armature est décapée, le produit ou le système conforme à la norme **NF EN 1504-7** est mis en œuvre à la brosse ou au pinceau **sur toute la surface de l'armature en évitant de l'appliquer sur le béton** pour ne pas nuire à l'adhérence du matériau de réparation.

La fiche technique du produit donne le délai d'attente pour la mise en œuvre du produit ou du système destiné à reconstituer le recouvrement des armatures.

Nota : *le produit actif peut être un métal plus électronégatif que l'acier des barres de béton armé comme le zinc. Au lieu de recouvrir les armatures in situ par un tel produit, il est souvent plus facile de remplacer les armatures corrodées, par exemple par des armatures galvanisées.*

4.3.3.4.6 Réalisation d'un revêtement non actif sur des armatures de béton armé

Les armatures doivent avoir été débarrassées de toute trace de corrosion et décapées au degré $Sa2^{1/2}$. Dès que l'armature est décapée, le produit ou le système conforme à la norme **NF EN 1504-7 est mis en œuvre sur toute la surface de l'armature en évitant de l'appliquer sur le béton.**

Nota : *il est, le plus souvent, préférable d'utiliser des armatures protégées en usine pour remplacer les armatures corrodées plutôt que de traiter les armatures en place.*

4.3.3.4.7 Réalisation d'une application d'inhibiteurs de corrosion sur béton

Rappel, le présent guide, dans plusieurs articles, attire l'attention sur les limites d'emploi des inhibiteurs de corrosion destinés à être appliqués à la surface des bétons, en particulier en présence de chlorures.

La mise en œuvre d'un inhibiteur est effectuée en respectant **les conseils de la notice technique du fabricant. La quantité de produit à mettre en œuvre** est celle qui a été fixée à la suite **de l'épreuve de convenance.**

La mise en œuvre d'un inhibiteur est précédée d'un dégagement et décapage des armatures corrodées. Elle est suivie d'un décapage de la totalité de la surface de la structure pour enlever les anciennes peintures, les anciens revêtements, les salissures, les traces de graisse, les micro-organismes… Enfin, un lavage soigné termine la préparation.

> La mise en œuvre d'un inhibiteur de corrosion se déroule normalement comme suit :

1. des moyens de protection sont mis en place contre les intempéries, l'ensoleillement direct…;
2. le produit est appliqué au pulvérisateur **sur la totalité de la surface de la structure** (sur les zones repiquées comme sur les autres) en une ou plusieurs passes ;
3. ensuite, il faut attendre que le produit pénètre dans le béton ;

4. l'inhibiteur risquant de nuire à l'adhérence du mortier de ragréage, il faut **éliminer le produit** encore présent à la surface du béton par **un rinçage soigné avant** de pouvoir procéder aux réparations des zones endommagées, qui se déroulent comme suit :

- un revêtement actif compatible avec l'inhibiteur est appliqué à la brosse ou au pinceau sur toute la surface des armatures apparentes,

- un produit ou un système de réparation conforme à la norme **NF EN 1504-3** est mis en œuvre pour restaurer en faible ou en forte épaisseur les zones dégradées Cette opération est suivie d'une cure des zones traitées ;

5. enfin, une nouvelle préparation de surface est effectuée avant de mettre en œuvre, si c'est prévu par le marché, un revêtement de surface conforme à la norme NF EN 1504-2. Suivant le cas, il est fait appel à un revêtement d'imperméabilité ou d'étanchéité capable de ponter les fissures, qui peut aussi résister à la pénétration des gaz et de la vapeur d'eau.

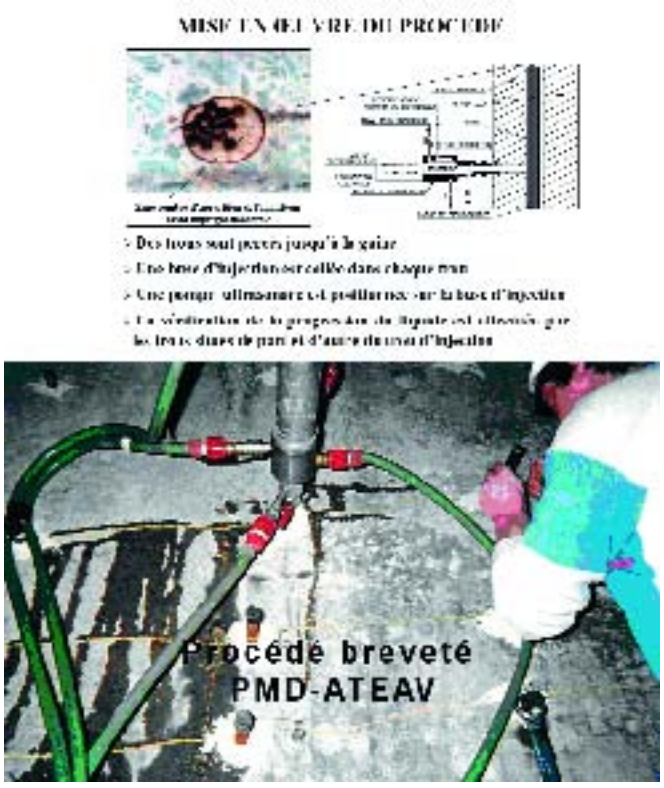


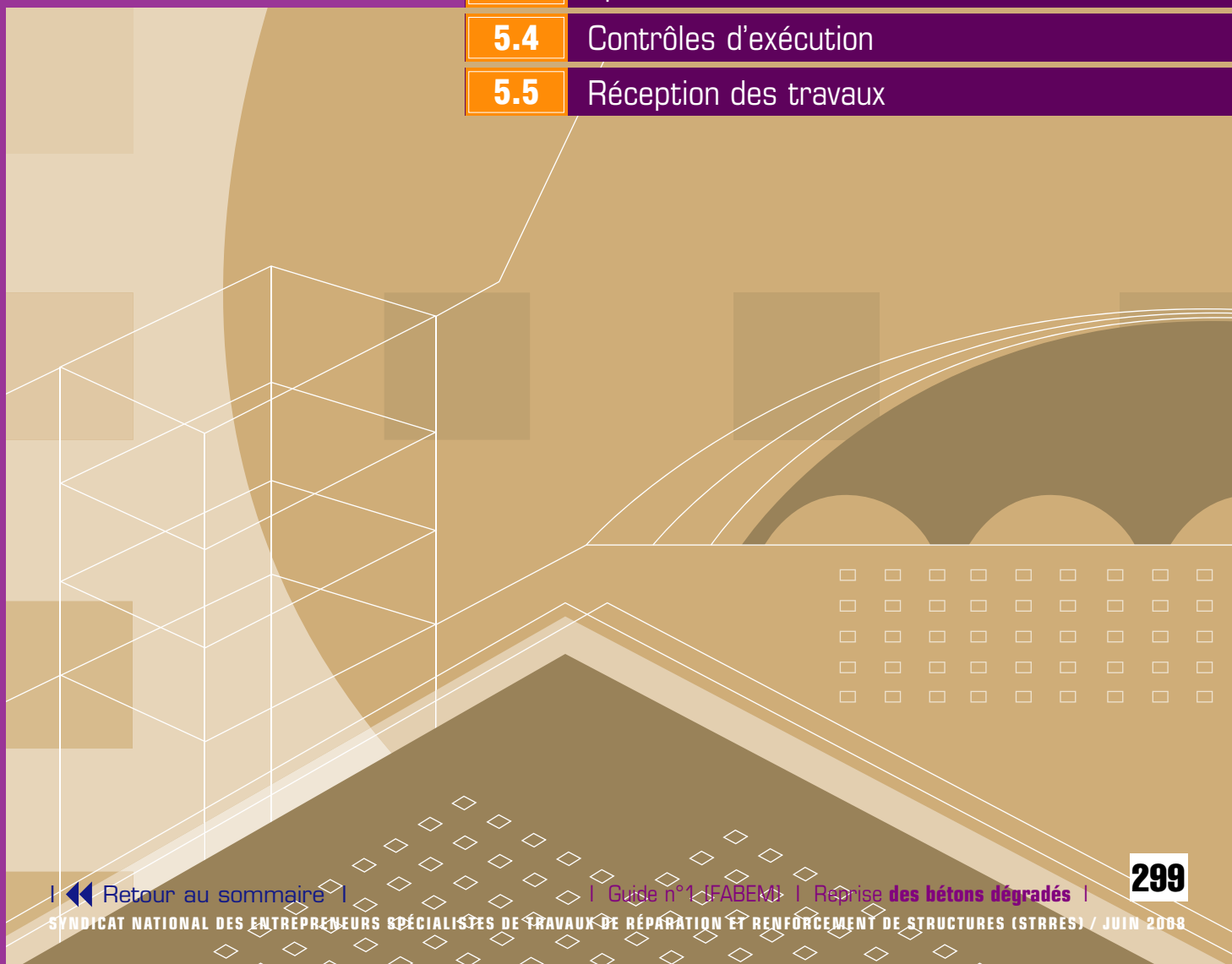
Photo n° 124 : procédé de stabilisation de la corrosion de câbles de précontrainte par inhibiteurs nitriles (crédit photo PMD-ATEAV)

4.3.3.4.8 Réalisation d'une réinjection de conduits de précontrainte

La réalisation d'une telle opération est très complexe. Elle est détaillée dans le **GUIDE N°8 [FABEM].**

5 Essais et contrôles

5.1 Généralités
5.2 Contrôles de réception des produits
5.3 Epreuves de convenance
5.4 Contrôles d'exécution
5.5 Réception des travaux



5.1 Généralités

La consistance des essais, de l'épreuve d'étude, de l'épreuve de convenance et des contrôles de réception et d'exécution est fixée par le marché qui complète en tant que de besoin les dispositions du présent guide. Elle est reprise dans les procédures et les cadres des documents de suivi du Plan d'Assurance de la Qualité (PAQ).

Parmi les contrôles, la plupart relèvent **du contrôle interne**, voire **du contrôle externe** à l'entreprise et les autres **du contrôle extérieur.**

Normalement, **le marché comporte un cadre de PAQ imposant une liste minimale de procédures et de cadres de documents de suivi à fournir ainsi que le nombre minimal des essais et contrôles à effectuer. L'entrepreneur** complète ce cadre dans son offre, en tant que de besoin, pour constituer une partie de son **PAQ.**

Les opérations **du contrôle extérieur** relèvent des exigences **du maître d'ouvrage** en matière d'assurance de la qualité. Elles ne sont donc pas développées dans le présent guide. **Le marché doit cependant** traiter de celles qui peuvent interférer avec la marche du chantier (opération nécessitant un arrêt partiel ou total du chantier).

Les opérations de contrôle externe à l'entreprise peuvent être demandées par **le marché** ou être proposées par **l'entrepreneur** dans le cadre de sa démarche qualité. Elles ne sont pas développées dans le présent guide.

> Les essais et contrôles à effectuer par l'entrepreneur lors «d'une opération de restauration du béton, ou de renforcement structural et/ou de restauration ou de prévention de la passivité des armatures» peuvent être rattachés aux cinq catégories suivantes :

- **l'épreuve d'étude (pour mémoire, se reporter à l'article 3.3.6 ci-dessus) ;**
- **les contrôles de réception des produits ;**
- **l'épreuve de convenance ;**
- **les contrôles d'exécution ;**
- **la réception des travaux**

> Les exigences de contrôle des documents de référence qui se rapportent, soit au domaine du bâtiment, soit à celui du génie civil, sont très hétérogènes. La suite du présent guide explicite les stipulations des différentes normes et des différents textes à caractère normatif et les complète, si besoin est. Par exemple :

- le chapitre 7 de la norme homologuée **NF P 95-101** décrit en deux pages **les essais et contrôles** à effectuer lors de travaux de réparation. Ces contrôles ne couvrent que **la restauration du béton dégradé superficiellement** et sont peu détaillés. Il renvoie aux normes de la série **P 18-8**.**

- **la norme NF EN 1504-10** traite des contrôles à effectuer lors de la mise en œuvre des diverses méthodes de réparation et/ou de renforcement et des méthodes de restauration ou de préservation de la passivité dans un tableau unique (le tableau 4), qui s'étend sur dix pages, d'une lecture difficile. Heureusement, **son annexe A informative** explicite en quelques lignes les différents contrôles et essais. Cette norme fixe aussi les valeurs maximales et/ou minimales à respecter, mais pour seulement une partie des caractéristiques (par exemple, température du support, point de rosée, adhérence…). Cependant, elle ne fixe pas l'importance quantitative des essais à effectuer, ni qui doit les exécuter.

Conclusions : le marché ne peut donc pas se contenter de viser les normes, il doit fixer l'importance des contrôles et désigner le ou les responsables de ces contrôles.

5.2.1 GÉNÉRALITÉS

Figure n° 42 : réception par le contrôleur des produits de réparation

Les **contrôles de réception** ont pour but de vérifier que les produits livrés sont conformes aux exigences du marché et qu'ils sont stockés conformément aux exigences visées à l'article 3.5 ci-dessus relatif au transport et au stockage des produits. Ils consistent notamment à vérifier les bordereaux de livraison, le marquage des produits, les dates de péremption et le bon état des emballages.

Dans le cas où les produits font l'objet d'une certification reconnue par le marché, aucun essai n'est nécessaire. Dans le cas contraire **le marché** définit la procédure à suivre.

5.2.2 RÉCEPTION DES PRODUITS PRÊTS À L'EMPLOI

5.2.2.1 Réception des produits de réparation normalisés

5.2.2.1.1 Généralités

Les conditions de réception des produits relevant des **normes françaises** sont visées par la norme homologuée **NF P 18-800**[59] (réception à l'usine ou sur le chantier) et le fascicule de documentation **FD P 18-802** (contrôles sur chantier).

Il faut noter que le règlement de **la Marque NF-Produits spéciaux ([NF 030])**[60] associé aux normes de la série **P 18-8**** ne traite que du marquage, mais pas des conditions de la réception des produits.

Les conditions de réception des produits relevant **des normes européennes et du marquage CE** sont visées par les normes **NF EN 1504-8** (relative au contrôle en usine [CPU]) et **NF EN 1504-10** (relative au contrôle sur le chantier).

[59] *Cette norme, en page 11, renvoie au fascicule de documentation FD P 18-801 mais, cette référence est erronée, il faut lire FD P 18-802.*

[60] *La conformité à une marque est décrite dans le GUIDE GÉNÉRAL (FASCICULE N°0).*

Sur le chantier, l'identification est réduite à la production **d'un document attestant de la certification des produits.**

Le fascicule de documentation **FD P 18-802** traite en détail **des contrôles de réception** et des essais à effectuer, mais il faut aussi se référer à la norme homologuée **NF P 18-800**, qui précise le mode de prélèvement, l'échantillonnage, les conditions d'intervention **du laboratoire** chargé **des essais contradictoires** en cas de défaut de conformité ainsi que de la ventilation des frais des essais.

Sauf disposition contraire du marché et conformément au fascicule de documentation **FD P 18-802,** les produits bénéficiant du droit d'usage **de la Marque NF** (ou d'une marque équivalente) sont réputés conformes aux normes qui les concernent. Il n'est donc pas nécessaire de procéder aux essais d'identification rapides et aux essais d'efficacité[61]. Les autres contrôles de la liste ci-après restent applicables, y compris les prélèvements conservatoires.

Le même principe est applicable aux produits et systèmes bénéficiant **du marquage CE** et **d'un système d'attestation de conformité du niveau 2+. Le marché** peut imposer des essais d'identification rapide si **le système d'attestation de conformité est du niveau 4.**

Le marché doit préciser que les contrôles de réception prévus par les normes en vigueur sont étendus aux conditions de transport et à celles de stockage qui ne sont pas visées par les normes.

> Les contrôles portent sur :

- les conditions de transport (conditions de protection des produits contre la chaleur et/ou le froid) ;
- l'état des emballages (tout récipient présentant des fuites, ouvert, sans étiquette doit être refusé et immédiatement évacué du chantier) ;
- le poids des produits prédosés ;
- la comparaison entre le bon de commande et le bordereau de livraison. La concordance porte également sur les étiquettes, emballages, containers, etc., le tout en conformité avec les documents techniques et contractuels ;
- **la remise d'un document** attestant que le produit bénéficie bien du droit d'usage d'une marque pour les produits certifiés et, en particulier, pour le marquage CE ;
- la conformité du marquage et, en particulier, les dates de péremption des produits et les classes ou catégories des produits (niveaux de performance) ;
- **l'exécution de prélèvements conservatoires ;**
- les conditions de stockage (le local doit être équipé d'un thermomètre à maxima et minima) ;
- la température du local dont la mesure est à renouveler pendant la durée du chantier en fonction de l'évolution des conditions météorologiques (en général la température du local doit rester comprise entre 10 et 25°C). ***ATTENTION,*** au respect du point éclair pour certains produits ;
- etc.

[61] *Dans le cas où **les conditions climatiques** de mise en œuvre des produits sur le chantier différent nettement de celles de la norme, il est nécessaire de faire des essais spécifiques lors de **l'épreuve d'étude.***

5.2.2.1.2 Réception des produits relevant des normes françaises de la série P 18-8**

Si le marché le prévoit, **des essais d'identification rapide** sont à effectuer par **un laboratoire** accepté par **le maître d'œuvre** conformément à l'article 3.2 du fascicule de documentation **FD P 18-802. Il est préférable de procéder à ces essais d'identification** ce qui évite d'avoir à effectuer immédiatement **les essais de vérification des caractères normalisés** à cause de la durée de ces deniers.

Si **les essais d'identification rapide** ne sont pas satisfaisants, il est procédé à **une analyse chimique complète** et **aux essais spécifiques d'efficacité** de l'article 3.3 du fascicule de documentation **FD P 18-802 qui portent sur certains des caractères normalisés.** Dans un tel cas, les produits ne pourront être utilisés qu'à partir du moment où les résultats des essais seront connus et favorables. **Un POINT D'ARRÊT** est lié aux essais d'identification rapide.

Si les essais d'identification rapide ne sont pas effectués, il est procédé **aux contrôles spécifiques d'efficacité** correspondants au produit. Les produits ne pourront être utilisés qu'à partir du moment où les résultats des essais seront connus et favorables. **Un POINT D'ARRÊT** est lié **aux contrôles spécifiques.**

Contrôles sur chantier	
Essais d'identification rapides	**Normes d'essai**
Produits à base des résines synthétiques (P) ou de liants hydrauliques (H)	
Contrôle du poids de chaque composant.	Conformité à la fiche technique du fabricant
Produits à base de résines synthétiques (P)	
Densité.	
Dureté shore.	NF EN ISO 868
Durée pratique d'utilisation (DPU).	NF P 18-810
Analyse granulométrique simplifiée de la charge (emballage séparé).	NF P 18-806
Produits à base de liants hydrauliques (H)	
Analyse granulométrique simplifiée de la charge.	NF P 18-806
Temps de prise des mortiers.	NF P 15-431
Temps de prise des coulis.	XP P 18-362
Contrôles spécifiques d'efficacité	**Normes d'essai**
Produits de réparation de surface	
Mesure de l'adhérence (5 pastilles au minimum).	XP P 18-852 ou XP P 18-858
Produits de collage structural (béton durci/béton durci ou béton frais/béton durci)	
Mesure de l'adhérence sur le support à traiter (support humide si collage béton frais/béton durci).	XP P18-852
Mesure de la résistance en compression.	NF EN ISO 604 (classement : T 51-101) ou NF EN 196-1
Produits d'injection	
Essai d'injectabilité à la colonne.	XP P 18-891
Essai de fendage.	XP P 18-892
Produits (P) de scellement	
Les essais d'identification rapide suffisent.	
Produits (H) de scellement	
Essai de flexion-compression.	NF EN 196-1
Produits (P) de calage	
Les essais d'identification rapide suffisent.	
Produits (H) de calage	
Mesure de la fluidité au cône de Marsch et évolution en fonction du temps.	XP P 18-358
Ressuage et stabilité ou ressuage en milieu confiné.	XP P 18-359 ou XP P 18-834
Essai de flexion-compression.	NF EN 196-1

Tableau n° 33 : tableau synthétisant les exigences du P 18-802

5.2.2.1.3 Réception des produits relevant des normes européennes de la série P 1504-**

Il est possible d'appliquer les principes issus des normes de la série **P 18-8**. Le marché** peut donc prévoir **des essais d'identification rapides** et même **des essais spécifiques d'efficacité.** La seule difficulté provient du fait que chaque norme européenne de produits donne dans un ou plusieurs tableaux **une liste d'exigences d'identification très volumineuse** qui a été établie pour **le contrôle en usine et non sur le chantier.**

Le tableau qui suit propose, pour les contrôles sur chantier, **les essais d'identification rapide et les essais spécifiques d'efficacité** qui peuvent être prescrits par le marché, soit sur les composants, soit sur les mélanges. Il faut noter que deux essais font référence à des normes de la série P 18-8** et qu'un autre essai fait référence à l'essai BT-CRIS décrit dans le **FASCICULE N° 4[FABEM].**

> D'autres essais peuvent être prescrits en fonction :

- des types de produits et systèmes utilisés. Par exemple, les systèmes de protection peuvent faire appel à des :
  - silanes et siloxanes (produits d'imprégnation),
  - polymères en solution ou dispersion (peintures),
  - résines époxydes,
  - résines polyuréthannes,
  - résines acryliques,
  - liants hydrauliques modifiés par des polymères ;
- des conditions d'application ou d'utilisation des produits et systèmes, qui peuvent être :
  - appliqués en intérieur ou en extérieur, sur une paroi verticale ou en sous-face,
  - soumis aux effets du gel/dégel avec ou sans sels de déverglaçage,
  - soumis aux effets du feu,
  - résistants au glissement et au dérapage…

Rappel important : lorsque les conditions environnementales (humidité, température…) risquent de différer des conditions des essais normalisés, il y a lieu de réaliser des essais de performances lors de l'épreuve d'étude, voire lors de l'épreuve de convenance, en liaison avec le fabricant.

Contrôles sur chantier	
Essais d'identification rapides	**Normes d'essai**
Produits à base des résines synthétiques (P) ou (PC) ou de liants hydrauliques (H)	
Aspect général et couleur.	Conformité à la fiche technique du fabricant et à l'étiquetage.
Contrôle du poids de chaque composant.	
Produits à base de résines synthétiques (P et PC)	
Analyse granulométrique des composants secs.	NF EN 12192-1 ou NF EN 12192-2
Masse volumique.	NF EN ISO 2811-1 et NF EN ISO 2811-2
Masse volumique (mortier frais).	NF EN 1015-6
Délai maximal d'utilisation (Durée pratique d'utilisation en pot (DPU))	NF P 18-810[62]
Temps de raidissement.	NF EN 13294

[62] *La norme NF P 18-810 peut être utilisée à des fins d'identification contrairement à la norme de laboratoire NF EN ISO 9514 relative à la mesure du délai maximal d'utilisation après mélange des systèmes de revêtement multicomposants.*

Produits à base de liants hydrauliques (H)	
Analyse granulométrique des composants secs.	NF EN 12192-1
Masse volumique.	NF EN ISO 2811-1 et NF EN ISO 2811-2
Masse volumique (mortier frais).	NF EN 1015-6
Temps de raidissement.	NF EN 13294
Temps de prise.	NF EN 196-1
Contrôles spécifiques d'efficacité	**Normes d'essai**
Systèmes de protection de surface pour béton (1504-2) cas des revêtements[63]	
Observation visuelle et aspect du feuil après application (bullage, cloquage, faïençage…).	
Essais d'arrachement sur le support à traiter ou sur le substrat de référence.	NF EN 1542
Mesure de la perméabilité à l'air in situ.	Essai BT CRIS
Viscosité.	NF EN ISO 3219
Produits de réparation de surface (1504-3)	
Essais d'arrachement sur le support à traiter ou sur le substrat de référence.	NF EN 1542
Résistance en compression	NF EN 12190
Consistance des mortiers frais.	NF EN 1015-4
Produits de collage structural (1504-4) (béton durci/béton durci ou béton frais/béton durci ou plaques)	
Mesure de l'adhérence sur support à traiter ou sur substrat de référence (humide si collage béton frais/béton durci).	NF EN 12636 ou NF EN 12615
Mesure de la résistance en compression.	NF EN 12190
Mesure de la résistance au cisaillement.	NF EN 12615
Aptitude à l'application sur des surfaces verticales ou en sous-face.	NF EN 1799
Aptitude à l'application sur des surfaces horizontales.	NF EN 1799
Produits d'injection (1504-5)	
Essai d'injectabilité en milieu sec ou non-sec.	NF EN 1771 et NF EN 12618-2
Résistance en traction, allongement et module d'élasticité (Produits P).	NF EN ISO 527-1
Résistance à la compression et masse volumique (produits H).	NF EN 12190
Produits (P) de scellement (1504-5)	
Les essais d'identification rapide suffisent.	
Résistance à la compression.	NF EN 1290
Consistance des mortiers frais.	NF EN 1015-4
Produits (H) de scellement (1504-6)	
Ouvrabilité : essai d'écoulement des coulis et mortiers	NF EN 13395-2
Résistance à la compression.	NF EN 1290
Produits (P) de calage (XP P 18-822)	
Les essais d'identification rapide suffisent.	
Produits (H) de calage (XP P 18-821)	
Temps découlement au cône de Marsch et évolution en fonction du temps	NF EN 14117
Essai de ressuage.	XP P 18-834
Essai de flexion-compression.	NF EN 196-1
Résistance à la compression.	NF EN 1290
Produits de protection contre la corrosion des armatures (1504-7)	
Thixotropie.	NF EN 13062
Dureté Shore D (à 7 jours).	NF EN ISO 868

Tableau n° 34 : essais d'identification rapide et contrôles spécifiques d'efficacité

[63] *Les imprégnations hydrophobes ou non peuvent être testés par des essais spécifiques.*

5.2.2.2 Réception des autres produits de réparation

5.2.2.2.1 Généralités

> Il s'agit ici des produits et systèmes utilisés :

- dans les traitements électrochimiques ;
- lors de l'application des inhibiteurs de corrosion à la surface des bétons.

5.2.2.2.2 Réception des produits pour une ré-alcalinisation ou une déminéralisation

Les produits et systèmes utilisés ne sont pas implantés à demeure dans l'ouvrage traité. **L'entrepreneur** détenteur du procédé propose dans **la procédure d'exécution** la liste et la provenance des matériaux nécessaires à l'opération. **Le marché** peut prévoir que le contrôle de réception porte simplement sur la conformité de la liste, sachant que les contrôles d'efficacité permettent de s'assurer de la performance des fournitures.

Les produits utilisés pour la réfection du béton dégradé, le traitement des armatures corrodées… et l'application finale d'un revêtement de protection relèvent de l'article 5.2.2.1 ci-dessus.

5.2.2.2.3 Réception des produits pour une prévention ou une protection cathodique

Les produits et systèmes utilisés restent à demeure dans l'ouvrage. Ils doivent donc présenter les qualités requises pour fonctionner pendant toute la durée de vie exigée de l'installation. **L'étude technique** effectuée en amont du lancement de la consultation doit définir les exigences de performances nécessaires. **Le marché** reprend ces exigences, qui doivent être adaptées aux propositions de **l'entrepreneur** lors de la signature du marché, et fixe **les essais et contrôles à effectuer lors de la réception des produits, matériaux et matériels.**

Les produits utilisés pour la réfection du béton dégradé, le traitement des armatures corrodées… et l'enrobage des anodes relèvent de l'article 5.2.2.1 ci-dessus.

5.2.2.2.4 Réception des produits inhibiteurs de corrosion sur béton

Le produit approvisionné sur le chantier doit être conforme aux caractéristiques du produit figurant sur la fiche technique du fabricant. **Le marché** peut prévoir un prélèvement conservatoire, voire une analyse chimique rapide.

Il faut noter que l'épreuve de convenance permet de s'assurer que la quantité de produit ayant pénétré dans le béton à proximité des armatures est au moins égale à la concentration minimale des spécifications du fabricant.

5.2.3 RÉCEPTION DES PRODUITS LIVRÉS SUR LE CHANTIER

Divers produits, systèmes et matériaux traditionnels sont livrés sur un chantier de réparation et/ou renforcement. Il s'agit des bétons ou des mortiers fabriqués en centrale, des ciments, des granulats, des adjuvants, des armatures passives ou actives… Tous ces produits et matériaux relèvent **de normes** et de documents d'exécution comme le **DTU 21** (norme **NF P 18-201)** ou **le fascicule 65A.**

Le marché peut donc s'appuyer sur ces documents en les complétant suivant les spécificités des travaux à exécuter.

5.2.4 RÉCEPTION DES PRODUITS FABRIQUÉS SUR LE CHANTIER

Le marché impose que les contrôles prévus pour les produits prêts à l'emploi et normalisés ou certifiés de l'article 5.2.2 ci-dessus soient applicables, après adaptation, **aux différents composants** des produits fabriqués sur le chantier et suivant leur nature.

En outre, il impose de procéder à des **contrôles spécifiques** permettant de s'assurer que les produits, ainsi fabriqués à l'état de mélange ou une fois durcis, **répondent aux exigences de performances,** soit des normes de la série **P18-8**** (lorsque les normes européennes se substitueront aux normes françaises, seuls les produits de calages seront concernés par les normes expérimentales **XP P 18-821 et XP P 18-822**), soit des normes **NF EN 1504-2 à NF EN 1504-7**.

Le marché fixe également les conditions de réception des produits fabriqués sur le chantier qui, par leur nature ou leur usage, n'appartiennent à la famille des produits et systèmes de traitement du béton dégradé, comme par exemple, un coulis de réinjection des conduits de précontrainte (se reporter au **GUIDE N°8[FABEM]**.

5.3.1 GÉNÉRALITÉS

La norme homologuée **NF P 95-101** rappelle qu'une **épreuve de convenance** a pour but de vérifier la conformité de la mise en œuvre des matériaux et produits de réparation par **l'entrepreneur** dans les conditions de réalisation des travaux. Les essais prévus **au marché** sont réalisés sur le site dans les conditions du chantier.

La norme **NF EN 1504-10** et le fascicule de documentation **FD P 18-802** ne prévoient **aucune épreuve de convenance** mais uniquement **des contrôles d'exécution.** La norme **NF P 95-101** impose **deux épreuves de convenance,** l'une sur le traitement de surface et l'autre sur la mise en œuvre des produits.

Les épreuves de convenance développées ci-après ont été élaborées à partir de l'ossature de ces différents documents et s'appliquent aux différentes **«méthodes de restauration du béton et/ou de renforcement structural et méthodes de restauration ou de conservation de la passivité des armatures»** développées dans le présent guide.

Le marché détaille la consistance **de l'épreuve de convenance de chaque méthode** et fixe ce qui relève des différents contrôles (interne et extérieur voire externe).

Les stipulations **du marché** sont reprises et complétées, si nécessaire, dans le **Plan d'Assurance de la Qualité (PAQ), les procédures et les documents de suivi.**

Toute épreuve de convenance se déroule en présence **du maître d'œuvre** et/ou de son représentant qui assurent la part des opérations liées **au contrôle extérieur. L'entrepreneur** effectue **son contrôle interne** défini par le **PAQ** et les stipulations **du marché.**

La réalisation des travaux ne peut commencer tant que **les épreuves de convenance** ne sont pas jugées satisfaisantes. Elles font partie du **POINT D'ARRÊT** dont la levée conditionne l'exécution des travaux.

L'ensemble des constatations effectuées lors des **épreuves de convenance** doit faire l'objet **d'une synthèse,** qui doit permettre de conclure sur la validité ou non des épreuves et sur les modifications éventuelles à apporter **au Plan d'Assurance de la Qualité** (procédures et document de suivi). Il appartient à **l'entrepreneur** de rédiger cette synthèse et de la remettre **au maître d'œuvre** qui, après examen, lève ou non **le POINT D'ARRÊT** relatif à l'exécution des travaux.

> Pour la majeure partie «des méthodes de réparation et/ou de renforcement ou celles de restauration ou de préservation de la passivité des armatures», l'épreuve de convenance concerne essentiellement les deux opérations suivantes :

- la préparation du support ;
- la mise en œuvre des produits.

Les essais qui sont effectués au cours **d'une épreuve de convenance** étant identiques à ceux effectués lors **des contrôles,** le présent guide fait donc les renvois nécessaires sans développer dans le détail l'épreuve de convenance relative à chaque méthode.

Nota : *pour des méthodes comme l'ajout de forces, la réinjection des conduits de précontrainte, il peut y avoir plusieurs* ***épreuves de convenance spécifiques.*** *Ces diverses épreuves de convenance sont développées dans* ***le GUIDE N°8 [FABEM].***

Ces deux opérations de convenance sont nettement séparées dans le présent article mais, sur le chantier, si cela est nécessaire, elles peuvent être enchaînées. Les résultats de ces deux épreuves doivent être positifs. Ils permettent **au maître d'œuvre** de prendre la décision **de lever le POINT D'ARRÊT qui permet la réalisation des travaux.**

5.3.2 ÉPREUVES DE CONVENANCE DE PRÉPARATION DU SUPPORT

La consistance de **ces épreuves de convenance** est normalement fixée **par le marché,** qui complète, si nécessaire, les dispositions du présent guide. Elles sont, en final, mises au point **dans la procédure de réparation. Elles fixent, en particulier, les types et le nombre des essais à effectuer.**

La préparation des surfaces concerne le béton support et les armatures apparentes éventuelles.

L'entrepreneur propose à l'acceptation **du maître d'œuvre les surfaces de référence** sur lesquelles sont appliquées les techniques de préparation du support béton et des armatures.

Les épreuves de convenance de préparation du support relatives à certaines **des méthodes** visées dans **le présent guide** sont déjà décrites **dans les autres guides de la collection [FABEM].** Afin d'éviter des redites, le lecteur est invité à se reporter à ces guides. **Les méthodes concernées et les guides correspondants sont listés dans le tableau suivant.**

Méthode	N° des articles et guide du STRRES
Mise en œuvre de produits ou systèmes en faible et en forte épaisseur par projection.	5.4.2.4.2 - 5.4.2.4.3 - N°5 [FABEM]
L'injection de l'interface entre le produit de réparation et/ou de renforcement et le béton de la structure.	5.4.2.4.5 - N°3 [FABEM]
L'injection de fissures ou de vides du béton.	5.4.2.4.6 - N°3 [FABEM]
Scellement d'armatures.	5.4.2.4.7 - N°7 [FABEM]
Collage d'armatures passives extérieures au béton (plaques et tissus).	5.4.2.4.10 - N°7 [FABEM]
Mise en œuvre de forces par précontrainte additionnelle.	5.4.2.4.11 - N°8 [FABEM]
Mise en œuvre de forces par déformations imposées.	5.4.2.4.12 - N°8 [FABEM]
Réinjection des conduits des armatures de précontrainte.	5.4.2.5.6 - N°8 [FABEM]
L'application d'imprégnations hydrofuges ou non ou de revêtement en complément d'une des autres.	N°4 [FABEM]
Le calfeutrement ou le pontage des fissures.	N°2 [FABEM]

Tableau n° 35 : correspondance entre les méthodes et les guides du STRRES

Les contrôles à effectuer au cours de **l'épreuve de convenance de préparation du support** pour **les autres méthodes** non traitées par **les autres guides** sont visés dans les articles ci-après relatifs **aux contrôles d'exécution.** Les articles sont listés dans le tableau ci-dessous.

Méthode	N° des articles
Mise en œuvre de produits ou systèmes en faible épaisseur (sauf cas de mise en place par projection).	5.4.2.4.2
Mise en œuvre de produits et systèmes en forte épaisseur (sauf cas de mise en place par projection).	5.4.2.4.3
Mise en œuvre de produits ou systèmes de collage (béton durci sur béton durci ou béton frais sur béton durci).	5.4.2.4.4
Mise en œuvre de produits ou systèmes pour le calage d'éléments.	5.4.2.4.8
Mise en œuvre d'armatures passives additionnelles internes au béton.	5.4.2.4.9
Mise en œuvre de produits ou systèmes pour : ☐ augmenter le recouvrement des armatures ; ☐ remplacer le béton carbonaté ou pollué ; ☐ ré-alcaliniser le béton carbonaté.	5.4.2.5.2
Mise en œuvre de traitements électrochimiques.	5.4.2.5.3
Mise en œuvre de revêtements actifs ou non sur les armatures.	5.4.2.5.4
Mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion à la surface des bétons.	5.4.2.5.5

Tableau n° 36 : articles relatifs aux contrôles d'exécution concernant certaines des méthodes du présent guide

5.3.3 ÉPREUVES DE CONVENANCE DE MISE EN ŒUVRE DES PRODUITS

La consistance de **ces épreuves de convenance** est normalement fixée **par le marché,** qui complète, si nécessaire, les dispositions du présent guide. Elles sont, en final, mises au point **dans la procédure de réparation. Elles fixent, en particulier, les types et le nombre des essais à effectuer.**

L'entrepreneur propose à l'acceptation **du maître d'œuvre les surfaces de référence** sur lesquelles sont appliquées les produits ou systèmes.

Rappel : Les essais qui sont effectués au cours d'une épreuve de convenance étant identiques à ceux effectués lors des contrôles, le présent guide fait donc les renvois nécessaires sans développer dans le détail l'épreuve de convenance relative à chaque méthode.

Chaque épreuve de convenance porte sur les quatre phases suivantes :

1. **la préparation de l'opération ;**
2. **la préparation des produits ;**
3. **la réalisation de l'opération** (par exemple, la mise en œuvre de produits et systèmes) ;
4. **l'après réalisation de l'opération.**

> ***Remarque :*** ***l'épreuve de convenance sur la préparation des surfaces*** *est traitée dans l'article précédent, il est possible de l'intégrer ici entre la phase 1 et la phase 2 en la considérant comme une cinquième phase.*

Les 2 premières phases concernent les contrôles généraux, la 3ème l'essai de convenance proprement dit et la 4ème les contrôles après mise en œuvre des produits.

Pour les méthodes visées dans le tableau ci-après (identique au Tableau n° 35 ci-dessus), la consistance de **l'épreuve de convenance** est donnée dans **les guides du STRRES n° 2 à 8 de la famille [FABEM].** Dans ces guides, comme dans celui-ci, les essais à effectuer lors de **l'épreuve de convenance** sont ceux effectués lors des **contrôles d'exécution relatifs aux 4 phases.**

Méthode	N° des articles			Guide du STRRES
	Préparation de l'opération	Préparation des produits	Réalisation de l'opération et l'après opération	
Mise en œuvre de produits ou systèmes en faible et en forte épaisseur par projection.	5.4.3.2	5.4.3.3	5.4.3.4.2 5.4.3.4.3	N°5 [FABEM]
Injection de l'interface entre le produit de réparation et/ou de renforcement et le béton de la structure.			5.4.3.4.5	N°3 [FABEM]
Injection de fissures ou de vides du béton.			5.4.3.4.6	N°3 [FABEM]
Scellement d'armatures.			5.4.3.4.7	N°7 [FABEM]
Collage d'armatures passives extérieures au béton (plaques et tissus).			5.4.3.4.10	N°7 [FABEM]
Mise en œuvre de forces par précontrainte additionnelle.			5.4.3.4.11	N°8 [FABEM]
Mise en œuvre de forces par déformations imposées.			5.4.3.4.11	N°8 [FABEM]
Réinjection des conduits des armatures de précontrainte.			5.4.3.5.5	N°8 [FABEM]
Application d'imprégnations hydrofuges ou non ou de revêtement en complément d'une des autres.				N°4 [FABEM]
Calfeutrement ou pontage des fissures.				N°2 [FABEM]

Tableau n° 37 : correspondance entre les méthodes et les guides du STRRES

Pour chacune des autres méthodes, le tableau ci-après donne **la liste des articles sur les contrôles d'exécution relatifs aux différentes phases. Il s'agit des contrôles à exécuter** pour valider l'épreuve de convenance correspondante.

Méthode	N° des articles		
	Préparation de l'opération	Préparation des produits	Réalisation de l'opération et l'après opération
Mise en œuvre de produits ou systèmes en faible épaisseur (sauf par projection).	5.4.3.2	5.4.3.3	5.4.3.4.2
Mise en œuvre de produits et systèmes en forte épaisseur (sauf par projection).			5.4.3.4.3
Mise en œuvre de produits ou systèmes pour calage d'éléments			5.4.3.4.8
Mise en œuvre d'armatures passives additionnelles internes au béton			5.4.3.4.9
Mise en œuvre de produits ou systèmes de collage (béton durci sur béton durci ou béton frais sur béton durci).			5.4.3.4.4
Mise en œuvre de produits ou systèmes pour : ☐ augmenter le recouvrement des armatures ; ☐ remplacer le béton carbonaté ou pollué ; ☐ ré-alcaliniser le béton carbonaté.			5.4.3.5.1
Mise en œuvre de traitements électrochimiques.			5.4.3.5.2
Mise en œuvre de revêtements actifs ou non sur les armatures.			5.4.3.5.3
Mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion à la surface des bétons.			5.4.3.5.4

Tableau n° 38 : articles traitant des contrôles des différentes méthodes

5.4.1 GÉNÉRALITÉS

Une grande partie des contrôles d'exécution à effectuer lors de l'exécution **«des méthodes de restauration du béton et/ou de renforcement structural et des méthodes de restauration ou de conservation de la passivité des armatures»** est définie dans la norme **NF EN 1504-10,** qui renvoie, soit aux autres normes relatives aux produits de la série, soit à d'autres normes d'essai.

> Le tableau 4 de cette norme liste les contrôles à effectuer lors de la mise en œuvre des différentes méthodes de réparation ou de renforcement traitées par cette norme aux différentes étapes de l'opération :

- préparation du support en béton et des armatures (contrôles avant et après la préparation);
- réception des produits et systèmes (pour mémoire) ;
- préparation et mise en œuvre des produits et systèmes (contrôles avant et après l'application) ;
- après la mise en œuvre (contrôles après durcissement).

Rappel : la norme ne précise pas le nombre des contrôles à effectuer ni qui en est chargé. Il est donc indispensable que le marché précise ce qui relève du contrôle interne et ce qui relève du contrôle extérieur.

Pour les méthodes non traitées ou exclues de la norme européenne, les essais de contrôle peuvent s'appuyer, soit sur des normes spécifiques (par exemple, pour certains des traitements électrochimiques), soit sur **les autres guides de la famille [FABEM].**

Pour les contrôles relatifs à la mise en œuvre des produits et systèmes visés par **la Marque NF-Produits Spéciaux,** il est possible de consulter le fascicule de documentation **FD P 18-802** et la norme **NF P 95-101.** Dans le fascicule de documentation, la partie consacrée aux contrôles d'exécution est nettement plus développée que dans la norme, qui ne traite que de généralités.

La consistance de **ces contrôles d'exécution** est normalement fixée **par le marché,** qui complète, si nécessaire, les dispositions du présent **guide.** Elle est, en final, mise au point **dans la procédure relative à l'opération. Sont fixés, en particulier, les types et le nombre des essais à effectuer.**

> Ces différents contrôles sont les mêmes que ceux effectués lors des différentes épreuves de convenance visées dans l'article 5.3 ci-dessus. Ils portent sur les points suivants :

- **la préparation du support ;**
- **l'opération qui comporte quatre phases :**
  - la préparation de l'opération,
  - la préparation des produits,
  - l'exécution de l'opération,
  - l'après exécution de l'opération.

Rappel : les contrôles de réception des produits sont effectués lors de leur arrivée sur le chantier. Ils figurent dans l'article 5.2 ci-dessus.

La levée du **POINT D'ARRÊT** relatif à la réalisation de l'opération a lieu lorsque le **maître d'œuvre** valide les contrôles liés aux épreuves de convenances, ceux de préparation du support (béton et armatures) et ceux relatifs à la préparation de l'opération. La mise en œuvre des produits n'est autorisée qu'après validation des contrôles sur la préparation les produits.

5.4.2 CONTRÔLES D'EXÉCUTION SUR LA PRÉPARATION DU SUPPORT

5.4.2.1 Généralités

La reconnaissance de l'état du support et des armatures fait normalement partie **de l'expertise préalable au diagnostic sur l'état de l'ouvrage** visée par l'article 3.2 ci-dessus.

L'état du support et des armatures est confirmé par **le relevé contradictoire** visé par les articles 3.1 et 4.2 ci-dessus.

La qualité du support béton et des armatures à obtenir **après leur préparation** est fixée par l'article 4.2.1.2 ci-dessus.

> Les contrôles d'exécution relatifs à la préparation du support béton et des armatures portent sur les points suivants :

- **la préparation de l'opération (matériel, personnel, accès, consignes...) ;**
- **la réception du support béton ;**
- **la réception des armatures apparentes.**

5.4.2.2 Contrôle d'exécution relatif à la préparation de l'opération de préparation du support

> Le contrôle d'exécution relatif à la préparation de l'opération de traitement du support béton et des armatures porte sur les points suivants :

- la validation par **le maître d'œuvre de l'épreuve de convenance de préparation du support ;**
- l'acceptation par **le maître d'œuvre** de la procédure et des cadres des documents de suivi relatifs à l'opération ;

- l'existence des documents donnant de l'état de surface du support relevé contradictoirement (avec les résultats des essais effectués à cette occasion) et de l'état de surface à obtenir. Ces documents sont à annexer à la procédure ;
- la mise en place des moyens d'accès et leur contrôle, suivant leur importance et si nécessaire, par les organismes habilités et en particulier le coordonnateur SPS ;
- la mise en place des dispositifs de protection pour assurer la préservation de l'environnement, la sécurité et la santé des usagers et des tiers ;
- la mise en place des dispositifs de protection pour éviter la pollution par la poussière, les salissures… des surfaces déjà traitées ;
- l'approvisionnement, la mise en place et la vérification du bon état, du bon fonctionnement et de l'étalonnage (si besoin est) du matériel nécessaire à l'opération ;
- l'approvisionnement des matériaux et produits et la validation des contrôles de leur réception;
- la présence des fiches techniques et des fiches de données de sécurité des produits à utiliser ;
- la présence d'un personnel qualifié et informé des travaux à effectuer ainsi que des consignes à respecter conformément à la procédure.
- la présence des équipements d'hygiène et de sécurité collectifs ou individuels ;
- la présence des instruments nécessaires aux mesures, contrôles et essais à effectuer ;
- la présence, si besoin est, du laboratoire chargé des contrôles et des essais ;
- le constat que les conditions climatiques permettent d'effectuer l'opération.

Photo n° 125 : essai de traction de surface (crédit photo VSL France)

5.4.2.3 Principes généraux relatifs aux contrôles de réception du support et des armatures

> Les principes généraux qui régissent les contrôles de réception du support et des armatures après, voire avant leur préparation sont les suivants :

- **pour la réception du support,** le contrôle porte sur l'aspect visuel de la surface traitée et sur le son franc que rend le béton sain au sondage sonique. Ces deux tests subjectifs peuvent être complétés par des essais in situ ou en laboratoire en fonction de l'origine des désordres, de la méthode de réparation à mettre en œuvre et des conditions d'application des produits. Le contrôle s'assure également que **la méthode de nettoyage** (brossage, aspiration, soufflage, lavage, etc.), après le décapage du béton, est compatible avec l'état du support sec ou humide imposé par la notice technique du produit ou système à appliquer, ainsi que par les normes ou les documents à caractère normatif. Ce contrôle comporte donc aussi un examen visuel des surfaces nettoyées ;

Photo n° 126 : dégagement insuffisant des armatures

ATTENTION, *il peut y avoir besoin* ***de contrôler une première fois le support et les armatures*** *avant la mise en place des produits et systèmes nécessaire à la réparation et/ou au renforcement, puis* ***une seconde fois, après une nouvelle préparation, la surface réparée,*** *avant l'application d'une imprégnation, d'un revêtement de protection…*

- **pour la réception des armatures apparentes,** un premier contrôle porte **sur la stabilité de la structure.** Le dégagement d'un grand nombre d'armatures sur de grandes longueurs n'est autorisé que s'il est prévu au contrat et si toutes les sécurités corrélatives (étaiements, etc.) ont été mises en œuvre. Un second contrôle porte **sur l'aspect des armatures** avant puis après traitement contre la corrosion. Après décapage et avant application du produit de protection contre la corrosion, les aciers doivent, normalement, être «blancs». Après traitement, les aciers doivent être parfaitement recouverts.

Photo n° 127 : exemple de travaux nécessitant un étaiement provisoire

La levée **du POINT D'ARRÊT** avant l'exécution des travaux de mise en œuvre des produits et systèmes est liée étroitement à un résultat positif des contrôles de préparation du support béton et des armatures.

La norme NF P 95-101 traite de la préparation du support et des armatures mais uniquement dans le cas d'une reprise du béton présentant une dégradation superficielle. Ce texte ne couvre donc pas toutes les méthodes traitées dans le présent guide.

Il est préférable que **le marché** s'appuie sur la norme **NF EN 1504-10,** qui liste dans **son tableau 4 les contrôles obligatoires** pour **toutes les applications prévues,** ceux pour **certaines applications prévues** et ceux pour **des applications particulières.**

La suite du présent article liste et explicite **les contrôles à effectuer** avant et, si nécessaire, après préparation du support pour chacune **des 16 méthodes de réparation et/ou de renforcement** traitées dans le présent guide (des renvois aux autres guides du STRRES sont effectués, si besoin est).

5.4.2.4 Contrôles d'exécution sur la préparation du support pour une restauration du béton et /ou un renforcement structural

5.4.2.4.1 Généralités

Les surfaces de référence de l'essai de convenance de préparation du support peuvent servir pour les contrôles visuels de préparation du support béton.

> La qualité du support béton à obtenir après sa préparation est fixée par les articles suivants :

- 4.2.1.2.1 ci-dessus relatifs aux tolérances de réalisation ;
- 4.2.1.2.2 ci-dessus relatif aux exigences de résultats sur la préparation du support béton;
- 4.2.1.2.4 ci-dessus relatif aux exigences de résultats sur le nettoyage du support béton ;
- 4.2.1.2.5 ci-dessus relatif aux exigences particulières de préparation du support en fonction de la nature des produits ou systèmes.
- 4.2.1.2.6 ci-dessus relatif aux exigences particulières de préparation du support en fonction de la méthode de réparation à mettre en œuvre.

Les contrôles à effectuer doivent porter sur le respect des exigences développées dans ces divers articles. Les articles qui suivent listent les points à contrôler en s'appuyant sur les exigences à satisfaire.

Les essais sur le support béton et/ou les armatures pour détecter des phénomènes de corrosion figurent dans l'article 5.4.2.5 ci-dessous. Dans la pratique, ils sont à effectuer en même temps que ceux concernant le support béton.

Rappels de l'article 4.2.1.2 ci-devant : si les armatures sont corrodées, elles doivent être dégagées totalement de leur gaine de béton. Si les armatures reçoivent un revêtement ou une barbotine, il faut mettre en œuvre le mortier ou le béton de réparation en respectant un certain délai.

5.4.2.4.2 Contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas de la mise en œuvre de produits et systèmes appliqués en faibles épaisseurs

Remarque : *la majeure partie des contrôles visés dans le présent article est applicable aux autres méthodes de réparation et/ou de renforcement.*

Des indications complémentaires peuvent être trouvées dans l'article A9 de l'annexe A informative de la norme ***NF EN 1504-10*** *qui explicite comment procéder* ***aux observations et essais.*** *De plus, il faut se reporter* ***au tableau 4*** *de la norme pour identifier les contrôles utiles* ***dans certaines utilisations prévues ou dans des applications spéciales (particulières).***

> Les contrôles à effectuer, quelle que soit la technique utilisée pour appliquer en faible épaisseur les produits et systèmes, se déroulent «avant ou après ou bien avant et après» la préparation du support. Ils portent sur tout ou partie des points suivants :

Nota : *les essais soulignés doivent être effectués dans tous les cas.*

- **la géométrie de la structure et la planéité des parois** doivent respecter les exigences **du marché** (se reporter aux normes **[DTU 21]** et aux documents à caractère normatif **[fascicule 65A]** en vigueur faute d'information dans la norme sur l'essai n°3). Les mesures de planéité se font à la règle de 2 m et au réglet de 20 cm, celles de verticalité au fil à plomb..., dans le but de procéder :

  - lors de la préparation du support béton :

  . aux corrections, qui peuvent être faites par repiquage, enlèvement, ponçage... , du béton en surépaisseur,

  . aux ragréages localisés pour faire les corrections des manques de béton au droit des flaches existantes, des nids de cailloux...,

  - après mise en œuvre et durcissement des produits et systèmes :

  . aux corrections des défauts de surface (surépaisseurs, trous, balèvres...) qui rendant le support béton inapte à recevoir un traitement de finition (par exemple, les revêtements de protection) ;

- **l'absence de décollements** (délaminations, vides...) est à mesurer par sondage au marteau de toutes les surfaces à préparer, avant et après leur préparation (se reporter à l'essai n°1 de la norme) ;

Nota : *d'autres techniques comme l'impact-écho, la thermographie infrarouge, les techniques ultrasonores..., qui permettent un contrôle rapide de surfaces importantes, peuvent être utilisées pour repérer les zones de délamination, les feuilletages, les couches de qualités différentes, les vides, les nids de cailloux et les inclusions.*

Photo n° 128 : sondage au marteau

- **la propreté du support** est à mesurer par un examen visuel et un essuyage ayant pour but de détecter, après la préparation et juste avant la mise en œuvre des produits (se reporter à l'essai n°2 de la norme) :

  - la poussière,
  - les détritus,
  - les salissures,
  - les traces de graisse,
  - les produits de cure,
  - les anciennes imprégnations,
  - les anciens revêtements… ;

Rappel : avant l'application du produit ou du système, le support doit parfois être humidifié, recevoir une barbotine ou un encollage…

- **la rugosité du support** est à mesurer, soit par un examen visuel, soit par un essai normalisé **(NF EN 1766, NF EN ISO 3274 et NF EN ISO 4288).** La rugosité est à mesurer dans le cas des parements glacés, si les essais d'adhérence lors de l'épreuve de convenance ont montré sa nécessité, si il est prévu de procéder après réfection du support béton au collage d'armatures passives extérieures au béton…(se reporter à l'essai n°4 de la norme) ;

- **la résistance à la traction** est à mesurer par des essais normalisés **(NF EN 1542).** Cette résistance est à mesurer lorsque le produit ou le système relève des classes R3 et R4 (exigences structurale) ou en cas de doute sur la qualité du support (se reporter à l'essai n°5 de la norme) ;

- l**es mouvements des fissures existantes** sont à mesurer au moyen de jauges électriques ou mécaniques (se reporter à l'essai n°7 de la norme) ;

Nota : *en fonction de l'importance des fissures et de leur activité, un traitement des fissures est à mettre en œuvre avant de procéder à l'application d'un produit ou d'un système de réparation compatible (se reporter* ***aux guides du STRRES n°2 et 3).*** *Dans certain cas, un renforcement structural est nécessaire. Normalement, l'expertise préalable aux travaux doit avoir détecté une telle insuffisance structurale, sauf si la partie de la structure n'était pas accessible au moment de cette opération.*

- **les vibrations de la structure** sont à mesurer au moyen d'un accéléromètre si les travaux d'application du produit ou du système doivent se dérouler en maintenant l'ouvrage en activité (se reporter à l'essai n°8 de la norme) ;

Nota : *les vibrations sont à redouter, par exemple pour le béton projeté.* ***L'épreuve de convenance*** *doit permettre de savoir si les vibrations peuvent nuire aux caractéristiques du produit ou du système (par exemple, par des mesures d'adhérence…). Les produits et systèmes à mettre en œuvre doivent avoir satisfait aux exigences de performance pour les* ***applications particulières.*** *Se reporter au* ***GUIDE N°5 [FABEM]*** *dans le cas du béton projeté.*

- **la teneur en eau du support** est à mesurer au moyen d'un essai de résistivité, de sondes d'humidité… dans le cas ou la fiche technique du produit ou du système à appliquer limite son emploi en présence d'humidité. Pour les produits et systèmes à base de liants hydrauliques, l'eau libre doit être ressuyée tout en conservant le support humide (se reporter à l'essai n°9 de la norme et **au GUIDE N°4 [FABEM]).**

Rappel : Les contrôles d'exécution sur la préparation du support, en cas de mise en place du produit ou du système par projection, relèvent de la norme NF EN 14487-2 et du GUIDE N°5 [FABEM].

5.4.2.4.3 Contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas de la mise en œuvre de produits et systèmes appliqués en fortes épaisseurs

Les contrôles et essais visés dans l'article précédent concernant la mise en œuvre de produits ou systèmes en faibles épaisseurs sont applicables au cas des fortes épaisseurs.

Lorsque la mise en œuvre de produits ou systèmes appliqués en fortes épaisseurs comporte **une reprise de bétonnage** (normalement traversée par des armatures), les règles de l'art **du DTU21** et **du fascicule 65A** s'appliquent.

Si le produit ou le système est mis en place **en plusieurs passes successives,** il faut contrôler avant chaque passe la qualité du support et veiller à respecter le délai entre les couches fixé par la fiche technique du produit ou système ou par les règles de l'art.

Rappel : les contrôles d'exécution sur la préparation du support, en cas de mise en place du mortier ou du béton par projection, relèvent de la norme NF EN 14487-2 et du GUIDE N°5 [FABEM].

5.4.2.4.4 Contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas d'un collage structural de bétons

■ Cas d'un collage béton durci sur béton durci :

Si l'opération porte sur la **réparation d'un élément en béton** dont une partie a été cassée, il suffit de contrôler que :

- les faces des deux morceaux à assembler se conjuguent parfaitement,
- la propreté des deux faces (absence de poussière, de dépôts graisseux…) est assurée,
- la température et l'humidité des deux morceaux permettent de mettre en place la colle conformément aux exigences de la fiche technique.

Si l'opération porte sur **l'assemblage de deux éléments en béton**[64]**,** les contrôles sur la préparation du support sont sensiblement identiques à ceux à effectuer lors de la mise en œuvre d'armatures passives par collage, technique visées par le **GUIDE N°7 [FABEM].** Le marché adapte les tolérances géométriques et de planéité du support aux fonctions que doit remplir l'assemblage et aux sollicitations qu'il peut subir.

[64] *Ce type d'assemblage concerne davantage le domaine du bâtiment que celui du génie civil, bien qu'un tel assemblage soit parfaitement envisageable lorsque les deux éléments une fois assemblés sont soumis à une forte compression (par exemple, le collage d'un dé d'appui supérieur sous le talon d'une poutre).*

Cas d'un collage béton frais sur béton durci :

Dans une telle opération, le collage a pour but d'améliorer l'adhérence entre les deux bétons au niveau de la reprise de bétonnage. L'état du support doit pouvoir permettre d'effectuer la reprise de bétonnage dans les règles de l'art.

Les contrôles d'exécution sur la préparation du support sont les mêmes que ceux exercés dans le cas de la mise en œuvre de produits et systèmes appliqués en fortes épaisseurs visés par l'article 5.4.2.4.3 ci-dessus.

5.4.2.4.5 Contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas d'une injection de l'interface entre le produit de réparation ou de renforcement et le béton support

Les contrôles d'exécution à effectuer sur la préparation du support, avant la réalisation d'une injection de fissures, sont détaillés dans **le tableau n°4** de la norme et dans le **GUIDE N°3 [FABEM].**

5.4.2.4.6 Contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas d'une injection ou d'un remplissage de fissures ou de vides du béton

Les contrôles d'exécution à effectuer sur la préparation du support, avant la réalisation d'une injection ou d'un remplissage de fissures ou de vides du béton, sont détaillés dans **le tableau n°4** de la norme et dans le **GUIDE N°2 [FABEM]** et le **GUIDE N°3 [FABEM].**

Une telle opération doit être précédée **d'un contrôle de l'état, vis-à-vis de la corrosion, des armatures existantes,** car les fissures, les nids de cailloux... favorisent la pénétration des agents agressifs.

5.4.2.4.7 Contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas de scellement d'armatures de béton armé

Le scellement d'armatures de béton armé est toujours lié à **une opération de renforcement structural** avec mise en place de produits et systèmes en fortes épaisseurs. Les armatures de béton armé scellées dans le béton d'une structure sont destinées, soit à remplacer des armatures endommagées, soit à augmenter la section des armatures, tout en assurant, pour certaines, un rôle d'armatures de couture de la reprise de bétonnage.

Une telle opération doit être précédée **d'un contrôle de l'état, vis-à-vis de la corrosion, des armatures existantes.**

Les contrôles d'exécution sur la préparation du support portent, d'une part, sur **la préparation des trous** qui doivent présenter les dimensions, la propreté et la rugosité requises et, d'autre part, sur **la préparation du reste du support, voire des armatures existantes,** pour que la reprise de bétonnage puisse être effectuée suivant les règles de l'art.

Les contrôles d'exécution à effectuer sur **la préparation des trous,** avant la réalisation des scellements des armatures de béton armé, sont détaillés dans **le tableau n°4** de la norme **NF EN 1504-10 et le GUIDE N°7 [FABEM].**

Les contrôles d'exécution à effectuer sur **la préparation du reste du support et des armatures existantes** sont détaillés dans les articles 5.4.2.4.3 ci-dessus et 5.4.3.5.3 ci-dessous.

5.4.2.4.8 Contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas de calages d'éléments

Les contrôles d'exécution à effectuer sur la préparation du support, avant la réalisation d'un calage d'éléments sont les mêmes que ceux effectués dans le cas de la mise en place de produits et systèmes sous forme d'un mortier ou d'un béton appliqué en faible ou en forte épaisseur et visés aux articles 5.4.2.4.2 ci-dessus et 5.4.2.4.3 ci-dessus.

Suivant la nature du produit ou du système qui peut être à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques, la température et le degré d'humidité du support doivent respecter les exigences de la fiche technique.

Le marché fixe la géométrie des pièces à assembler et les tolérances à respecter, de façon que l'épaisseur du mortier ou du coulis soit la plus uniforme possible afin d'éviter des tassements différentiels par fluage. Il est possible de s'inspirer de l'article B.8.6 des règles **BAEL 91 révisées 99,** qui donne les dispositions à respecter dans les assemblages de poteaux préfabriqués.

5.4.2.4.9 Contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas de la mise en œuvre d'armatures passives additionnelles internes au béton

Les contrôles d'exécution à réaliser lors de la mise en œuvre d'armatures de béton armé additionnelles internes au béton sont fixés par les documents de référence que sont le **DTU 21** pour le domaine du bâtiment et **le fascicule 65A** pour le domaine du génie civil.

Une telle opération doit, normalement, être précédée **d'un contrôle de l'état des armatures existantes vis-à-vis de la corrosion.**

La norme européenne sur l'exécution des ouvrages en béton est encore au stade **d'ENV** c'est-à-dire à caractère expérimental. Il s'agit de la norme **NF ENV 13670-1** : Exécution des ouvrages en béton – Partie 1 : tronc commun et document d'application nationale.

5.4.2.4.10 Contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas de collages d'armatures passives extérieures au béton

Les contrôles d'exécution à effectuer sur la préparation du support, avant la réalisation d'un collage d'armatures passives extérieures au béton, portent sur la géométrie et la planéité du support (par exemple, les exigences de planéité sont très strictes dans le cas des plaques métalliques), la résistance à la traction du béton support, la rugosité de la surface… Ils sont détaillés dans **le tableau n°4** de la norme **NF EN 1504-10 et le GUIDE N°7 [FABEM].**

Une telle opération (sauf sur une structure très récente peu exposée à des agents agressifs) doit être, obligatoirement, précédée d'un contrôle de l'état des armatures existantes vis-à-vis de la corrosion, car les délaminations dues à la corrosion des armatures peuvent provoquer la ruine d'un tel renforcement.

5.4.2.4.11 Contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas d'un l'ajout de forces par précontrainte additionnelle

La mise en œuvre d'une précontrainte additionnelle nécessite d'effectuer de multiples opérations mettant en jeu, soit des méthodes du présent guide, soit d'autres méthodes. Une telle opération fait appel au scellement et l'ajout d'armatures de béton armé, à la création de massifs en béton pour l'ancrage des unités de précontrainte, à la création de déviateurs en béton pour moduler le tracé des câbles, à l'injection des fissures éventuelles… Il y a donc de nombreuses préparations du support en béton à réaliser.

Une telle opération doit être précédée **d'un contrôle de l'état, vis-à-vis de la corrosion, des armatures passives et actives existantes.**

Les contrôles d'exécution à effectuer sur **la préparation du support dans le cas de l'ajout de forces par précontrainte additionnelle** sont détaillés dans **le GUIDE N°8 [FABEM].**

5.4.2.4.12 Contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas d'un l'ajout de forces par déformations imposées

La mise en œuvre de déformations imposées peut nécessiter d'effectuer plusieurs opérations mettant en jeu différentes méthodes de réparation ou de renforcement avant de pouvoir exercer les déformations. Diverses méthodes de préparation du support en béton peuvent être nécessaires.

Les contrôles d'exécution à effectuer sur **la préparation du support dans le cas de l'ajout de forces par déformations imposées** sont détaillés dans **le GUIDE N°8 [FABEM].**

Une telle opération, si besoin est, peut être précédée **d'un contrôle de l'état, vis-à-vis de la corrosion, des armatures existantes.**

5.4.2.5 Contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas de la restauration ou de la conservation de la passivité des armatures

5.4.2.5.1 Généralités

***ATTENTION,* les surfaces de référence qui ont servi lors de l'essai de convenance** *de préparation des armatures ne peuvent servir ensuite pour les contrôles visuels de préparation des armatures, puisque la rouille réapparaît très rapidement sur des armatures décapées «à blanc».*

> La qualité de préparation des armatures à obtenir est fixée par les articles suivants :

- 4.2.1.2.3 ci-dessus relatif aux exigences sur la préparation des armatures ;
- 4.2.1.2.4 ci-dessus relatif aux exigences de résultats sur le nettoyage des armatures ;
- 4.2.1.2.6 ci-dessus relatif aux exigences particulières de préparation des armatures en fonction de la méthode de réparation à mettre en œuvre.

Les contrôles à effectuer doivent porter sur le respect des exigences développées dans ces divers articles. Les articles qui suivent listent les points à contrôler en s'appuyant sur les exigences à satisfaire.

Dans le cas où la réparation et/ou le renforcement concernent **un ouvrage récent** situé dans un environnement **pas particulièrement agressif,** il n'est, normalement, **pas nécessaire de contrôler l'état des armatures et la présence d'agents agressifs dans le béton,** sauf en cas de doute sur leur enrobage ou la qualité du béton.

Dans les autres cas, le choix de la méthode de restauration ou de conservation de la passivité des armatures à mettre en œuvre impose de connaître la profondeur de pénétration des agents agressifs et/ou leur dosage… Les mesures correspondantes sont, normalement, à effectuer **lors de l'expertise.** Il est cependant souhaitable de contrôler **après la préparation du support en béton et, si nécessaire, après le dégagement des armatures corrodées,** les mêmes paramètres.

> Les contrôles et essais à mettre en œuvre portent sur tout ou partie des points suivants :

Nota : *les essais soulignés doivent être effectués dans tous les cas.*

- **la position et l'enrobage des armatures** sont à déterminer, par exemple, dans les zones où la profondeur de carbonatation doit être mesurée, si une mesure du potentiel d'électrode est prévue… (cette mesure ne figure pas dans le tableau n°4 de la norme **NF EN 1504-10);**
- **la profondeur de carbonatation** est à mesurer au moyen d'un réactif coloré, en général la phénophtaléine, conformément à la norme **NF EN 14630.** Ensuite, elle est à comparer à l'enrobage des armatures (se reporter à l'essai n°11 de la norme) ;
- **la teneur en chlorures** est à mesurer si une telle pollution est à redouter. Les mesures sont effectuées en laboratoire sur des échantillons prélevés sur site conformément à la **NF EN 14629.** La mesure s'effectue à diverses profondeurs, de manière à déterminer le profil des chlorures (dosage en fonction de la profondeur). Le profil des chlorures est à comparer à l'enrobage des armatures (se reporter à l'essai n°12 de la norme) ;
- **la pénétration d'autres polluants,** par exemple, en cas d'agression chimique, est à mesurer par des prélèvements effectués sur place. Les analyses se font en laboratoire (se reporter à l'essai n°13 de la norme) ;
- **la contamination des fissures,** voire des reprises de bétonnage, est à mesurer par analyse de carottes prélevées en place. Une pénétration de polluants est à redouter lorsque les fissures sont soumises à une circulation d'eau… Dans un tel cas, les armatures peuvent être fortement corrodées (se reporter à l'essai n°14 de la norme) ;
- **la résistivité électrique apparente** est à mesurer pour détecter les zones de corrosion actives, c'est-à-dire, là où le degré d'humidité du béton est élevé. Dans ces zones, la résistivité apparente est faible. Dans le cas de traitements électrochimiques, il faut mesurer la résistivité apparente du matériau réparation (se reporter à l'essai n°15 de la norme) ;
- **la propreté des armatures existantes** est à vérifier si la méthode de réparation impose, soit de nettoyer l'armature pour enlever la rouille non adhérente, soit de décaper l'armature jusqu'au degré Sa2 ou $Sa2^{1/2}$ de la norme **ISO 8501-1** (se reporter à l'essai n°16 de la norme **NF EN1504-10)** ;

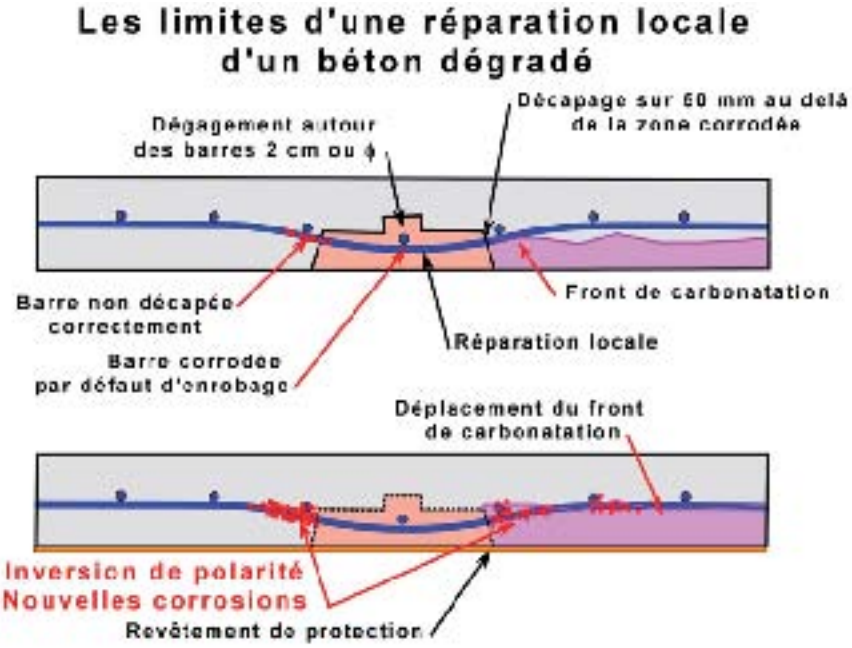


Figure n° 43 : conséquences si les principes à respecter lors du dégagement d'armatures corrodées ne sont pas respectés

- **les dimensions des armatures existantes** sont à mesurer mécaniquement (par exemple, au pied à coulisse…) dans le cas où la corrosion a entraîné une réduction de la section des armatures passives. Cette mesure est nécessaire au recalcul de la capacité portante de la structure (se reporter à l'essai n°17 de la norme). Le cas des armatures actives est traité dans le **GUIDE N°8 [FABEM] ;**

- **la corrosion des armatures existantes** peut être estimée par un examen visuel après avoir dégagé les armatures de leur couverture de béton. Cet examen ne permet pas de connaître l'état des autres armatures non apparentes. Pour ces dernières, l**a mesure du potentiel d'électrode** (se reporter aux recommandations **ASTM[C876-91]** ou **RILEM[TC 154-EMC]**) permet de détecter les zones où la corrosion est peu probable, incertaine ou très probable (se reporter à l'essai n°18 de la norme). Des mesures de **la résistivité électrique apparente ou de la vitesse de corrosion** (cette dernière mesure ne figure pas dans la norme) peuvent compléter les mesures du potentiel ;

- **la propreté des armatures passives extérieures** est à vérifier. Cette mesure concerne les tôles collées, qui doivent être décapées au degré $Sa2^{1/2}$. Les tissus ou les plaques composites doivent être nettoyés comme l'indique leur procédure de mise en œuvre (se reporter à l'essai n°19 de la norme et **au FASCICULE N°7 [FABEM]**) ;

5.4.2.5.2 Contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas du remplacement d'un béton carbonaté ou pollué ou d'une augmentation du recouvrement des armatures pour apporter des alcalins et/ou augmenter la résistivité du béton

■ **Dans le cas du remplacement du béton carbonaté ou pollué :**

Les contrôles d'exécution de la préparation du support en béton sont les mêmes que ceux nécessaires en cas de mise en œuvre de produits ou de systèmes en faibles ou fortes épaisseurs visés dans les articles 5.4.2.4.2 et 5.4.2.4.3 ci-dessus. Il faut aussi s'assurer que l'inclinaison des bords des zones où le béton a été enlevé respecte un angle compris entre 90 et 135° ± 5° pour assurer une bonne liaison mécanique du matériau d'apport sur celui d'origine. Si la mise en œuvre d'un revêtement de protection est prévue, la surface, après remplacement du béton, doit respecter les tolérances de forme, de planéité et de texture adaptées au produit.

Les contrôles d'exécution sur la préparation des armatures sont ceux donnant la profondeur de carbonatation, les profils de polluants, la corrosion et la propreté des armatures. Il faut aussi s'assurer que :

- les armatures sont dégagées sur une longueur d'au moins 50 mm au-delà de la partie corrodée,
- les armatures sont dégagées pour respecter la distance minimale (15 mm ou Cg + 5 mm) entre l'armature et la surface du support après avoir enlevé le béton d'enrobage (se reporter à l'article 4.2.1.2.3 ci-dessus),
- la distance minimale susvisée est au moins de 20 mm et qu'un lavage soigné à l'eau a été exécuté si le béton est pollué par des chlorures,
- les armatures ont reçu un revêtement de protection contre la corrosion, sous réserve que la méthode de mise en œuvre du matériau de réparation soit compatible avec un tel revêtement,
- que le remplacement des armatures trop corrodées ou nécessaires au renforcement structural ait été effectué et que les enrobages prescrits pourront être respectés (il y a lieu d'effectuer, si nécessaire, le contrôle des scellements, des manchonnages ou des soudures des armatures ajoutées…)…

■ **Dans le cas d'une augmentation du recouvrement des armatures :**

Les contrôles d'exécution de la préparation du support béton sont les mêmes que ceux nécessaires en cas de mise en œuvre de produits ou de systèmes en faibles épaisseurs visés par l'article 5.4.2.4.2 ci-dessus. Si la mise en œuvre d'un revêtement de protection est prévue, la surface, après mise en place du recouvrement, doit respecter les tolérances de forme, de planéité et de texture adaptées au produit.

5.4.2.5.3 Contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas de traitements électrochimiques

■ **Dans le cas d'une ré-alcalinisation et/ou d'une déminéralisation :**

Les contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures à effectuer sont les suivants (se reporter au **FD CEN/TS 14-308-1) :**

- les contrôles visés dans les deux articles précédents relatifs aux contrôles de préparation des armatures (position et enrobage des armatures, profondeur de carbonatation, profils de chlorures…),
- les contrôles nécessaires lors d'un remplacement du béton carbonaté ou pollué dans les zones dégradées par la corrosion. Il n'est pas nécessaire de contrôler que les armatures sont décapées «à blanc»,
- le contrôle de la propreté du support et de l'enlèvement de toutes les parties métalliques (clous, morceaux de ligatures, inserts…) pouvant être la source de courts-circuits,
- le contrôle de la résistivité des matériaux de réparations anciennes, laquelle doit rester inférieur à 200% de celle du béton de la structure,
- le contrôle de la résistivité du matériau de réparation, laquelle doit respecter également le seuil de résistivité de 200%,
- les contrôles de l'état du support, une fois le traitement électrochimique terminé, qui doit être compatible avec la mise en œuvre d'un revêtement de protection…

■ **Dans le cas d'une prévention ou d'une protection cathodique** (se reporter à la norme **NF EN 12696) :**

Les contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures à effectuer sont les suivants :

- les contrôles visés dans les deux articles précédents relatifs aux contrôles de préparation des armatures (position et enrobage des armatures, profondeur de carbonatation, profils de chlorures…),
- les contrôles nécessaires lors d'un remplacement du béton carbonaté ou pollué dans les zones dégradées par la corrosion. Il n'est pas nécessaire de contrôler que les armatures sont décapées «à blanc au degré SA2»,
- le contrôle de la propreté du support et de l'enlèvement de toutes les parties métalliques (clous, morceaux de ligatures, inserts…) pouvant être la source de courts-circuits,
- le contrôle de la résistivité des matériaux de réparations anciennes, laquelle doit rester inférieur à 200% de celle du béton de la structure,
- le contrôle de la résistivité du matériau de réparation, laquelle doit respecter également le seuil de résistivité de 200%,
- les contrôles de l'état du support béton de la structure, de façon à pouvoir mettre en œuvre le produit ou le système servant à l'enrobage de l'anode et appliqué en faible épaisseur. Ces contrôles sont ceux de l'article 5.4.2.4.2 ci-dessus…

5.4.2.5.4 Contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas de la mise en œuvre de revêtements actifs ou non sur des armatures de béton armé

■ **Dans le cas d'un revêtement actif :**

Les contrôles d'exécution portent sur l'état de propreté et de corrosion des armatures à recouvrir. Il faut s'assurer que les armatures sont décapées au niveau Sa2 «nettoyage – décapage profond» visé par la norme **ISO 8501-1.**

■ **Dans le cas d'un revêtement non actif :**

Les contrôles d'exécution portent sur l'état de propreté et de corrosion des armatures à recouvrir. Il faut s'assurer que les armatures sont décapées au niveau $Sa2^{1/2}$ «nettoyage – décapage très profond» visé par la norme **ISO 8501-1.**

5.4.2.5.5 Contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas de la mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion sur béton

> Les contrôles d'exécution sur la préparation du support béton et des armatures à effectuer sont les suivants :

- les contrôles visés dans les articles précédents relatifs aux contrôles de préparation des armatures (position et enrobage des armatures, profondeur de carbonatation, profils de chlorures…) ;
- les contrôles nécessaires lors de l'enlèvement du béton carbonaté ou pollué dans les zones dégradées par la corrosion. Les contrôles portent sur le béton support et les armatures ;
- le contrôle de la propreté du support, qui doit être débarrassé de la poussière, des salissures, taches de graisse (se reporter à l'article 5.4.2.4.2 ci-dessus),
- après l'exécution des réparations locales et une nouvelle préparation du support, des contrôles de celui-ci doivent être effectués pour s'assurer de sa propreté, de sa rugosité et du respect des tolérances de forme, de planéité et de texture adaptées au revêtement de protection à mettre en œuvre sur l'ensemble des surfaces traitées.

Rappel : après application de l'inhibiteur sur toute la surface du béton de la structure à traiter et après le délai d'attente nécessaire à la pénétration du produit, il faut contrôler qu'un rinçage soigneux a été effectué pour enlever les traces d'inhibiteur avant la réalisation des réparations par ajout de mortier ou béton des zones dégradées.

5.4.2.5.6 Contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas d'une réinjection de conduits de précontrainte

Les contrôles d'exécution sur la préparation du support dans le cas d'une réinjection de conduits de précontrainte sont développés dans **le GUIDE N°8 [FABEM].**

5.4.3 CONTRÔLES D'EXÉCUTION DES TRAVAUX

5.4.3.1 Généralités

Les contrôles d'exécution des travaux ont pour but de vérifier qu'à tout instant du chantier, l'exécution des travaux est conforme aux spécifications **du marché,** complétées par les enseignements tirés des épreuves de convenance. Ils portent sur :

- **les conditions de préparation de l'opération ;**
- **les conditions de préparation des produits et systèmes ;**
- **les conditions de mise en œuvre des produits et systèmes ;**
- **le contrôle des performances obtenues.**

Une grande partie des contrôles d'exécution à effectuer lors de l'exécution **«des méthodes de restauration du béton et/ou de renforcement structural et des méthodes de restauration ou de conservation de la passivité des armatures»** est définie dans la norme **NF EN 1504-10,** qui renvoie, soit aux autres normes relatives aux produits de la série, soit à d'autres normes d'essai.

Le tableau 4 de cette norme liste les contrôles à effectuer lors de la mise en œuvre des différentes méthodes de réparation ou de renforcement traitées par cette norme.

Rappel : la norme ne précise pas le nombre des contrôles à effectuer, ni qui en est chargé.

Pour les méthodes non traitées ou exclues de la norme européenne, les essais de contrôle peuvent s'appuyer, soit sur **des normes spécifiques** (par exemple, pour les traitements électrochimiques), soit sur **les autres guides de la famille [FABEM].**

Les résultats des contrôles effectués lors de l'exécution d'une opération et/ou après l'exécution de cette opération sont validés par **le maître d'œuvre.** Dans le cas où les résultats ne correspondent aux performances prescrites, **les non-conformités** détectées doivent faire l'objet d'un traitement. L'entrepreneur procède à la mise en conformité et propose à l'acceptation **du maître d'œuvre** les mesures correctives qu'il compte appliquer.

La levée du POINT D'ARRÊT avant réception des travaux est liée à l'acceptation des résultats des différents contrôles effectués pendant et après l'exécution des travaux.

5.4.3.2 Contrôles d'exécution lors de la préparation de l'opération

> Les contrôles d'exécution relatifs à la préparation de l'opération portent sur les points suivants :

- la présence et la prise de connaissance de tous les documents nécessaires (procédure d'exécution, documents de suivi, fiches techniques et de sécurité des produits et systèmes, modes d'emploi et d'entretien des matériels…) ;
- le constat de la réalisation des opérations préalables : l'épreuve de convenance de préparation du support et la préparation du support… ;

- l'acceptation par **le maître d'œuvre du support après sa préparation et des contrôles correspondants ;**
- l'acceptation par **le maître d'œuvre de la procédure et des cadres des documents de suivi** relatifs à l'opération ;
- la mise en place des moyens d'accès et leur contrôle, suivant leur importance et si nécessaire, par les organismes habilités et, en particulier, le coordonnateur SPS, voire le chargé des ouvrages provisoires (COP) ;
- la mise en place des dispositifs de protection pour assurer la préservation de l'environnement, la sécurité et la santé des usagers et des tiers ;
- la mise en place des dispositifs de protection pour éviter la pollution par la poussière, les salissures… des parties en cours de traitement ou déjà traitées ;
- l'approvisionnement, la mise en place et la vérification du bon état, du bon fonctionnement et de l'étalonnage (si besoin est) du matériel nécessaire à l'opération ;
- l'approvisionnement des matériaux et produits ;
- la présence des fiches techniques et des fiches de données de sécurité des produits à utiliser ;
- la présence d'un personnel qualifié et informé des travaux à effectuer ainsi que des consignes à respecter conformément à la procédure.
- la présence des équipements d'hygiène et de sécurité collectifs ou individuels ;
- la présence des instruments nécessaires aux mesures, contrôles et essais à effectuer ;
- la présence, si besoin est, du laboratoire chargé des contrôles et des essais ;
- la vérification que toutes les personnes pouvant se trouver dans l'environnement du chantier ont été informées des consignes de sécurité à respecter ;
- la constatation du respect des exigences en matière de température et d'hygrométrie de l'atmosphère et du support. Ces mesures sont à renouveler durant toute l'application de la protection, à chaque reprise du travail et en cas de changement climatique. Les moyens de protection contre les précipitations, l'ensoleillement direct… doivent être disponibles sur le chantier et mis en œuvre, si nécessaire ;
- etc.

> Le tableau A2 de la norme européenne harmonisée NF EN 1504-10 résume les exigences en matière de température et d'hygrométrie pour l'application des produits et systèmes lors de la mise en œuvre de la majeure partie des 16 méthodes «de restauration du béton et/ou de renforcement structural ou de restauration et/ou de préservation de la passivité des armatures». Ces exigences sont les suivantes :

- **la température du support** est à mesurer avec un thermomètre de surface. Celle-ci doit normalement être comprise entre +5°C et +30°C (se reporter à l'essai n°10) ;

- **en cas de précipitations,** le chantier doit mettre en œuvre les dispositifs de protection, sauf lorsque les produits et systèmes peuvent être appliqués sur des supports humides mais non ruisselants (se reporter à l'essai n°23) ;
- **la vitesse du vent** est à mesurer avec un anémomètre présent en permanence sur le chantier. La vitesse à ne pas dépasser est d'environ 8m/s, soit 30 km/h afin d'éviter une évaporation trop rapide (se reporter à l'essai n°24) ;
- **la température du support** doit être > +3°C au dessus du point de rosée. La température de l'air est à mesurer avec un thermomètre disponible en permanence sur le chantier (se reporter à l'essai n° 25) et l'humidité relative de l'air par les moyens visés par la norme **ISO 477 1-2** (se reporter à l'essai n°22) ;
- **la teneur en eau du support et des fissures** est à contrôler, soit visuellement (support sec, humide ou mouillé), soit à l'aide de sondes d'humidité. La présence ou non d'humidité est fonction de la nature du produit (se reporter à l'essai n°9) ;
- etc.

Certaines des méthodes, comme l'ajout d'armatures passives internes au béton, l'ajout de forces, les traitements électrochimiques et la réinjection des conduits de précontrainte, peuvent faire l'objet d'exigences particulières en matière de température et d'hygrométrie.

5.4.3.3 Contrôles d'exécution lors de la préparation des produits

5.4.3.3.1 Généralités

La norme française **NF P 95-101** indique uniquement qu'il convient de contrôler les conditions de préparation des matériaux, sans dire sur quels points doit porter ce contrôle.

La norme européenne **NF EN 1504-10** ne vise que les contrôles traditionnels à effectuer sur les bétons, mortiers et coulis. Se reporter aux essais n°27 relatifs à la consistance (essais d'affaissement, d'étalement, ou d'écoulement) et à l'essai n°28 sur la teneur en air du béton frais (cas où les effets du gel sont à redouter).

Compte tenu de la **«légèreté»** des contrôles proposés par les deux normes, il est nécessaire que **le marché** précise les contrôles à effectuer et leur nombre lors de la préparation des produits et systèmes en s'inspirant des indications ci-après.

> Sur les 16 méthodes de réparation ou renforcement visées par le présent guide, la majeure partie utilise :

- des produits prêts à l'emploi à préparer par malaxage ou mélange sur le chantier, tels que :
  - des produits à base de résines de synthèse pures ou chargées (résines d'injection et de collage, mortiers de ragréage, produits de scellement et de calage…),
  - des produits à base de liants hydrauliques modifiés par des polymères (coulis d'injection, mortiers de ragréage, produits de scellement et de calage…),
  - des produits à base de liants hydrauliques (mortiers et bétons traditionnels) ;

Les articles qui suivent détaillent les contrôles qui peuvent être mis en œuvre lors de la préparation de ces produits. Il est également possible de se reporter aux guides du **STRRES** de la famille **[FABEM]** lorsqu'il s'agit de produits utilisés pour réaliser des traitements de protection des bétons, des traitements de fissures, des scellements d'armatures ou le collage d'armatures passives extérieures au béton.

- des mortiers et bétons traditionnels prêts à l'emploi, soit fabriqués en usine et livrés sur le chantier, soit fabriqués sur le chantier à partir des composants traditionnels.

Les contrôles de fabrication des mortiers et bétons, traditionnels ou non, sont développés dans les normes **NF EN 1504-10 et NF EN 206-1** et dans **le DTU 21** ou le **fascicule 65A**, auxquels il convient de se reporter pour rédiger la liste et le contenu des contrôles de préparation des produits.

Les méthodes de réparation ou de renforcement globales, comme **l'ajout de forces, la réinjection des conduits de précontrainte,** utilisent des produits et matériaux appartenant aux diverses catégories ci-dessus. Les contrôles à effectuer sont traités dans **les différents guides du STRRES** de la famille **[FABEM], auxquels il convient de se reporter.**

Les méthodes particulières, comme **les traitements électrochimiques, la mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion,** font appel à des produits particuliers dont la préparation relève de la fiche technique du procédé à laquelle il convient de se reporter pour rédiger le contenu des contrôles à effectuer.

Dans le cas de conditions d'application spéciales et/ou exceptionnelles (par exemple, températures extrêmes…) l'interprétation de l'épreuve d'étude permet de fixer les conditions du contrôle. **L'entrepreneur** propose celles-ci à l'acceptation **du maître d'œuvre.**

5.4.3.3.2 Cas de la préparation de produits prêts à l'emploi à base de résines de synthèse ou de liants hydrauliques modifiés par des résines de synthèse

> Les contrôles d'exécution lors de la préparation de ces produits portent sur les points suivants :

- les exigences en matière de température et d'hygrométrie (voir l'article 5.4.3.3.2 ci-dessus),
- le respect des règles de sécurité liées aux fiches techniques,
- l'étiquetage des pots ou des bidons pour vérifier que le produit est bien celui à mettre en œuvre (nature et couleurs) et que la date de péremption n'est pas dépassée,
- la présence des composants nécessaire à l'élaboration du produit ou système de protection ([base + durcisseur] ou [résine en émulsion + charges] pour les bicomposants, [base + durcisseur + charges] pour les tricomposants…),
- la qualité apparente des différents composants à l'ouverture des récipients,
- le transvasement de la totalité des composants dans le récipient réservé au mélange (en général celui qui contient la base) et dans l'ordre fixé par la fiche technique. Toute erreur à ce niveau risque d'entraîner un défaut de durcissement du produit et la perte de ses performances,

- l'outil de mélange des composants, qui doit être identique ou le même que celui utilisé durant l'épreuve de convenance (même puissance, même vitesse…) afin de minimiser l'inclusion de bulles d'air, l'échauffement du mélange,
- le temps de mélange,
- l'homogénéité du produit (absence de grumeaux) et de sa teinte à la fin du mélange,
- le temps de mûrissement avant utilisation,
- la réalisation des prélèvements qui peuvent être nécessaires pour effectuer les essais liés aux usages des produits (injection, collage, ragréage…) :
  - l'ouvrabilité **(NF EN 13395-1, NF EN 13395-2 et NF EN 13395-3),**
  - la viscosité **(NF EN ISO 3219),**
  - la durée de vie en pot ou durée pratique d'utilisation pour les produits à base de résines **(NF P 18-810),**
  - le temps de raidissement **(NF EN 13294),**
  - la dureté Shore D pour les produits rigides (≥ 60) après polymérisation **(NF EN ISO 868) ;**
- etc. ;

5.4.3.3.3 Cas de la préparation des produits à base de liants hydrauliques

> Les contrôles d'exécution lors de la préparation des mortiers portent sur les points suivants :

1. Cas des produits prêts à l'emploi :

- le respect des règles de sécurité liées aux fiches techniques,
- l'étiquetage des sacs pour vérifier que le produit est bien celui à mettre en œuvre (nature et couleur) et que la date de péremption n'est pas dépassée,
- la qualité apparente du produit à l'ouverture du sac (absence de mottes…),
- la machine de malaxage des composants, qui doit être identique ou la même que celle utilisée durant l'épreuve de convenance (même capacité, même puissance, même vitesse…) afin d'obtenir le malaxage requis,
- la vérification que tous les composants nécessaires ont été introduits dans l'auge (malaxage ou avec un mélangeur à hélice) ou la cuve (malaxage mécanique) affectée au mélange, dans l'ordre et en respectant les quantités conformément à la procédure d'exécution (normalement, les produits prêts à l'emploi sont prédosés et la totalité de la charge du sac ou du récipient doit être utilisée conformément à la fiche technique),
- la quantité d'eau ajoutée, qui doit être celle prévue dans la fiche technique (la température de l'eau est à vérifier, si nécessaire),
- le temps de malaxage,

- l'homogénéité du produit (absence de grumeaux) et de sa teinte à la fin du mélange,
- la réalisation des prélèvements qui peuvent être nécessaires pour effectuer les essais liés aux usages des produits (injection, collage, ragréage…) :
  - l'ouvrabilité (NF EN 13395-1, NF EN 13395-2 et NF EN 13395-3),
  - temps d'écoulement au cône de Marsh (NF EN 14117),
  - le temps de raidissement (NF EN 13294),
  - le temps de prise (NF EN 196-3) ;
- etc.

2. Cas des produits fabriqués sur le chantier (il faut ajouter à la liste 1 ci-devant) :

- l'état et l'étalonnage des moyens de pesée,
- la vérification que les adjuvants nécessaires ont été introduits en respectant les quantités fixées dans la procédure d'exécution,
- etc.

5.4.3.4 Contrôles d'exécution dans le cas de la restauration du béton et /ou du renforcement structural

5.4.3.4.1 Généralités

Le présent article porte à la fois sur **les contrôles d'exécution lors de la réalisation de l'opération** (par exemple, mise en œuvre de produits ou de systèmes) et **sur ceux après réalisation de l'opération** (par exemple, après durcissement des produits et systèmes).

Le marché fixe les contrôles à opérer ainsi que leur nombre en fonction des exigences de performance recherchées.

ATTENTION, *les contrôles d'exécution développés dans cet article sont relatifs aux 16 méthodes de réparation ou de renforcement visées par le présent guide. Ils sont présentés* ***dans un certain ordre qui n'est pas forcément celui dans lequel les travaux doivent s'exécuter*** *lorsque plusieurs de ces méthodes sont associées.*

Pour chaque méthode de réparation ou de renforcement (par exemple, l'application d'un produit ou d'un système en faibles ou fortes épaisseurs), **les contrôles concernent les différentes techniques de mise en œuvre** utilisables (par exemple, manuelle, par projection…).

Les contrôles sont basés sur ceux prescrits par la norme **NF EN 1504-10** ou, pour certaines des méthodes, sur les documents de référence existants (normes, documents à caractère normatif…), le tout avec les compléments qui s'imposent.

Il est conseillé au lecteur de se reporter à l'article 4.3.3 qui décrit dans le détail la réalisation des différentes méthodes de restauration du béton ou de renforcement structural.

> Quelle que soit la méthode de réparation ou de renforcement mise en œuvre, les points suivants doivent faire l'objet de contrôles :

- le respect des règles de sécurité ;
- le respect des dispositions de la procédure d'exécution **(PAQ),** des fiches techniques et des fiches de données de sécurité,
- l'humidification préalable du support (cas des produits à base de liants hydrauliques), une teneur en eau limitée du support pour certains produits, la mise en œuvre d'une barbotine ou d'un primaire d'accrochage pour d'autres. Ces derniers produits imposent de respecter un certain délai pour la mise en œuvre du mortier ou du béton de réparation ou renforcement ;
- l'évolution des conditions thermiques et hygrométriques de l'atmosphère et du support, qui fait **l'objet des mesures décrites dans l'article 5.4.3.2 ci-dessus** (zone d'application soumise à un ensoleillement direct, arrivée de la pluie et/ou du vent, baisse de la température…) et les dispositions prises pour en réduire les effets (mise en place de protection, arrêt de chantier…) ;
- la protection contre la poussière, les salissures en provenance de la préparation de surface d'une autre zone ;
- l'arrêt de l'exploitation de l'ouvrage si les vibrations sont incompatibles avec l'application des produits et systèmes ;
- les dispositions appliquées en cas d'incident de chantier (panne de matériel, mauvaise mise en œuvre…) ;
- la gestion des documents de suivi. Les défauts d'exécution doivent faire l'objet d'un relevé sur plans ;
- les précautions prises, en particulier pour éviter les reprises visibles lors des interruptions de mise en œuvre (pause déjeuner, fin de journée…) ;
- les quantités de produits ou de systèmes utilisés,
- la durée des différentes phases d'une opération,
- le personnel affecté à l'opération,
- le rendement obtenu (par exemple, au m^2),
- etc.

Rappel : si des travaux complémentaires sont à effectuer avant ou après la réparation ou le renforcement (par exemple, une injection de fissure, l'application d'un revêtement de protection), il faut effectuer les contrôles d'exécution correspondants (se reporter aux guides du STRRES de la famille [FABEM]).

5.4.3.4.2 Contrôles d'exécution dans le cas de la mise en œuvre de produits et systèmes appliqués en faibles épaisseurs

5.4.3.4.2.1 Cas des applications manuelles

> Les contrôles d'exécution pendant l'opération portent sur les points suivants :

- le respect des consignes de la fiche technique et de la procédure,
- les produits et systèmes (se reporter à l'article sur la préparation des produits),
- le respect de la durée d'utilisation du produit ou système,
- l'utilisation des outils prévus par la fiche technique,
- la rigidité des éventuels coffrages servant de guide et la solidité de leur fixation,
- le serrage soigné des produits mis en place à la truelle, en particulier en présence d'armatures (le bourrage de l'espace derrière l'armature est indispensable),
- le respect du délai entre les couches successives éventuelles,
- le respect du délai entre la mise en place du produit ou du système et le talochage de finition,
- le respect des tolérances sur la rectitude des arêtes,
- le respect de l'épaisseur du produit ou du système mis en place avant son durcissement et de l'enrobage des armatures (utilisation d'une pige),
- le respect de la géométrie et de la texture exigée lors de la finition de surface,
- l'absence de décollement local visible du produit de réparation après sa mise en place, en particulier pour un produit ou un système appliqué en sous-face,
- le respect du délai de décoffrage, à adapter en fonction de la température,
- la réalisation de la cure,
- etc. ;

> Les contrôles d'exécution après l'opération portent sur les points suivants :

- les décollements éventuels du produit de réparation. Se reporter à l'essai n°1 sur les sondages au marteau. Cet essai systématique doit être complété par les essais qui suivent en cas de doute sur la qualité de l'adhérence du matériau de réparation ou de renforcement :

  - l'adhérence du matériau de réparation ou de renforcement par un essai d'arrachement. Se reporter à l'essai n°35 et à la norme **NF EN 1542,**
  - la présence de vides dans ou derrière le matériau de réparation ou de renforcement. Se reporter à l'essai n°39 qui indique que trois procédés peuvent être utilisés : les ultrasons visés par la norme **NF EN 1504-4**, la radiographie (cas très exceptionnel) visée par la norme **NF A 09-202** et le carottage suivi d'un examen visuel,

- la présence de fissures dans le matériau de réparation ou de renforcement par un examen visuel avec, si nécessaire, l'utilisation d'un fissuromètre ou d'un compte-fils,
- la géométrie, la planéité, la couleur et la texture, par un examen visuel avec recours, si nécessaire, à la règle de 2,00 m, au réglet de 20 cm et aux planches (teinte et texture) du fascicule de documentation **FD P 18-503,**
- d'autres essais, suivant les exigences du marché et pour compléter les essais précédents, peuvent être exécutés :
  - l'épaisseur du matériau de réparation ou de recouvrement des armatures une fois durci, par un examen visuel, un carottage ou un profomètre (mesure de l'enrobage). Se reporter à l'essai n°34 et à la norme **NF EN 12504-1,**
  - la masse volumique du matériau de réparation ou de renforcement durci. Se reporter à l'essai n° 37 et à la norme **NF EN 12390-7** (masse volumique des bétons),
  - la résistance en compression sur éprouvette normalisée (dans le cas où le produit participe à un renforcement structural). Se reporter à l'essai N° 36 et aux normes **NF EN 12390-1, NF EN 12390-2 et NF EN 12390-3.** Un scléromètre peut aussi être utilisé (se reporter à la norme **NF EN 12504-2),**
  - la perméabilité aux liquides. Se reporter à l'essai n°32 et aux normes **NF EN 12390-8,**
  - la perméabilité à l'air par l'essai **BT CRIS.** Se reporter au **GUIDE N°4 [FABEM],**
  - la résistance au glissement et au dérapage (comparaison avec une plaquette étalon). Se reporter à la norme **NF EN 13036-4,**
  - etc.

5.4.3.4.2.2 Cas des applications mécanisées

La mise en œuvre mécanisée de produits ou systèmes en faibles épaisseurs fait appel à **la projection par voie sèche ou par voie mouillée.** Le détail des contrôles spécifiques à effectuer figure dans **le GUIDE N°5 [FABEM]** qui se réfère aux normes **NF P 95-102, NF EN 14487-1**[65] (norme de spécifications) et **NF EN 14487-2** (norme d'exécution). Les contrôles essentiels sont rappelés ci-dessous. Il faut noter que les contrôles relatifs aux applications manuelles sont aussi à mettre en œuvre, sauf ceux relatifs à l'emploi des outils manuels.

> Les contrôles d'exécution pendant l'opération portent sur les points suivants :

- se reporter aux contrôles relatifs aux applications manuelles ci-dessus,
- les contrôles essentiels lors de la projection portent sur les points suivants :
  - la qualification du porte-lance et ses équipements de protection,
  - la rigidité des fixations des armatures existantes pour limiter leur vibration lors de la projection,
  - l'essai d'affaissement pour les bétons mis en œuvre par voie mouillée,

[65] *Les différents fascicules disponibles sur le site : www.asquapro.asso.fr complètent la norme européenne sur la formulation et le dimensionnement.*

- l'orientation de la lance de projection et la distance entre celle-ci et la surface à traiter,
- le remplissage du vide en arrière des armatures existantes,
- l'épaisseur maximale de la couche et le délai entre les couches,
- la réalisation d'une couche complémentaire dans le cas où un talochage de finition est requis,
- la cure,
- etc.

> Les contrôles d'exécution après l'opération portent sur les points suivants :

■ se reporter aux contrôles relatifs aux applications manuelles ci-dessus,

■ les contrôles essentiels après projection portent sur les points suivants :

- la granularité et la composition réelle du mortier ou béton frais sur prélèvements,
- la densité apparente et la résistance à la compression d'éprouvettes carottées dans les échantillons prélevés (projection dans des caisses plates),
- l'homogénéité du matériau projeté et l'absence de vides à l'interface avec le support. Le contrôle au marteau est à compléter par des essais au scléromètre, par ultrasons… déjà cités ci-dessus,
- l'adhérence au support par l'essai d'arrachement. Se reporter à l'essai n°35 et à la norme NF EN 1542,
- etc.

5.4.3.4.3 Contrôles d'exécution dans le cas de la mise en œuvre de produits et systèmes appliqués en fortes épaisseurs

ATTENTION, *ces types de travaux concernent le plus souvent* ***un renforcement structural.*** *Il faut s'assurer, lors des contrôles, que les matériaux mis en place participent effectivement à la reprise des efforts dus, soit aux charges appliquées postérieurement au renforcement, soit à l'ensemble des charges appliquées à la structure. Cela implique, par exemple, la mise sur un cintre provisoire suivie d'un décintrement, des vérinages, l'ajout de forces… Il appartient* ***au marché*** *de fixer les contrôles spécifiques complémentaires à mettre en œuvre qui relèvent de la topométrie, de l'extensométrie… Se reporter* ***au GUIDE N°8 [FABEM].***

5.4.3.4.3.1 Cas des applications manuelles

Les contrôles d'exécution à effectuer pendant et après l'opération dans le cas de la mise en œuvre de matériaux en faibles épaisseurs sont utilisables lorsque les épaisseurs sont importantes. **Se reporter à l'article 5.4.3.4.2 ci-dessus.**

5.4.3.4.3.2 Cas des applications mécanisées

Se reporter aux contrôles relatifs aux applications manuelles pendant et après l'opération, qui s'appliquent pour la plupart aux applications mécanisées de matériaux en fortes épaisseurs.

1.Cas de la mise en œuvre des produits et systèmes par bétonnage dans des coffrages :

Les différents contrôles à effectuer relèvent pour le domaine du bâtiment du **DTU 21** et pour le domaine du génie civil **du fascicule 65A du CCTG,** auxquels il convient de se reporter pour fixer le détail des contrôles.

> Les contrôles d'exécution pendant l'opération portent sur les points suivants :

- les ouvrages provisoires éventuels,
- les coffrages et la qualité des parements et des autres surfaces coffrées ou non à obtenir,
- les traitements de surface après durcissement du béton,
- la mise en place des armatures de béton armé existantes ou additionnelles, voire d'armatures de précontrainte[66],
- la mise en œuvre des bétons :
  - la mesure de la consistance au cône d'Abrams (consulter les normes **NF EN 12350-1 et NF EN 12350-2)** qui est inadaptée aux BHP lorsque l'affaissement dépasse 20 ± 2 cm et également aux BAP,
  - la durée limite de mise en œuvre,
  - les conditions de bétonnage,
  - la vibration nécessaire pour les bétons ordinaires (pour les BHP, après étude),
  - la cure indispensable,
- le décoffrage et le décintrement (des opérations préalables sont parfois nécessaires),
- les traitements de surface après durcissement du béton,
- etc.

Photo n° 129 : contrôle d'étalement d'un BAP (crédit photo LRPC Clermont - M. Geoffray)

[66] *Rappel, les travaux sur un ouvrage précontraint nécessitent des précautions particulières pour ne pas mettre en jeu la sécurité de la structure.*

> Les contrôles d'exécution après l'opération portent sur les points suivants :

- se reporter aux contrôles relatifs aux applications manuelles ci-dessus,
- les autres contrôles essentiels après projection portent sur les points suivants :
  - la résistance à la compression, voire à la traction par fendage à 7 jours et 28 jours d'éprouvettes 16x32 (se reporter à la norme **NF EN 206-1),**
  - l'homogénéité du matériau projeté et l'absence de vides à l'interface avec le support. Le contrôle au marteau est à compléter par des essais au scléromètre, par ultrasons, par carottage… déjà cités ci-dessus,
  - l'adhérence au support par l'essai d'arrachement. Se reporter à l'essai n°35 et à la norme **NF EN 1542,**
  - etc.

2. Cas de la mise en œuvre des produits et systèmes par injection dans des coffrages étanches :

> Les contrôles d'exécution pendant l'opération portent sur les points suivants :

- le matériel d'injection et la présence d'un limitateur de pression,
- les coffrages, qui doivent être rigides et étanches (essai à l'air),
- la présence des évents d'injection et de purge,
- la mise en place des armatures de béton armé existantes ou additionnelles, voire d'armatures de précontrainte,
- l'injection :
  - la fluidité du produit à injecter (les valeurs limites sont fixées en fonction des résultats de l'épreuve de convenance),
  - la pression d'injection et le volume injecté,
  - l'exsudation et le ressuage du coulis (les valeurs limites sont fixées en fonction des résultats de l'épreuve de convenance),
  - la purge des évents avant leur fermeture,
  - le maintien de la pression en fin d'injection,
  - la durée limite de mise en œuvre,
  - la cure indispensable,
- le décoffrage et le décintrement (des opérations préalables sont parfois nécessaires),
- les traitements de surface après durcissement mortier ou du béton,
- etc.

> Les contrôles d'exécution après l'opération portent sur les points suivants :

- se reporter aux contrôles relatifs aux applications manuelles ci-dessus,
- les autres contrôles essentiels après injection portent sur les points suivants :
  - la résistance à la compression, voire à la traction par fendage à 7 jours et 28 jours d'éprouvettes,
  - l'homogénéité du matériau projeté et l'absence de vides à l'interface avec le support. Le contrôle au marteau est à compléter par des essais au scléromètre, par ultrasons… déjà cités ci-dessus,
  - l'adhérence au support par l'essai d'arrachement. Se reporter à l'essai n°35 et à la norme **NF EN 1542,**
  - etc.

3. Cas de la mise en œuvre des produits et systèmes par projection :

Photo n° 130 : projection dans une boîte pour essais sur éprouvettes carottées (crédit photo D. Poineau)

Les contrôles d'exécution sont décrits dans l'article 5.4.3.4.2 ci-dessus et dans l**e GUIDE N°5 [FABEM].**

Photo n° 131 : restauration du Grand Rocher du Zoo de Vincennes (crédit photo D. Poineau)

5.4.3.4.4 Contrôles d'exécution dans le cas d'un collage structural de bétons

> Les contrôles d'exécution pendant l'opération portent sur les points suivants :

- l'état du support et sa géométrie (surfaces horizontales, verticales ou en sous-face),
- l'absence de vibrations ou un niveau de vibrations acceptable,
- la durée pratique d'utilisation du produit (DPU). Se reporter à la norme **NF P 18-810,**
- le temps ouvert. Se reporter à la norme **NF EN 12189,**
- la couche d'imprégnation en résine pure (primaire), éventuellement mise en place pour durcir la peau du béton,
- le respect du délai entre la mise en place du primaire et celle de la colle chargée,
- la mise en place de la colle, qui doit recouvrir le béton et non les armatures existantes,
- l'épaisseur du film de colle, à mesurer au moyen d'une pige ou d'une jauge à peigne ou à roue dentée,
- le respect du délai entre la mise en place de la colle chargée et celui de la pose de l'élément de béton durci ou la mise en place du mortier ou du béton frais,
- l'efficacité du serrage (pression) dans le cas du collage béton durci sur béton durci (la colle doit baver latéralement),
- tous les contrôles relatifs au bétonnage, dans le cas d'un collage d'un béton frais sur un béton durci (pour mémoire),
- etc.

> Les contrôles d'exécution après l'opération portent sur les points suivants :

- se reporter aux contrôles relatifs aux applications manuelles ci-dessus,
- le nettoyage des bavures de colle,
- l'évolution de la dureté shore de la colle sur des coupelles (épaisseur de produit > 6 mm et surface > 25 cm^2) conservées dans les conditions du chantier (il est nécessaire de connaître les courbes d'évolution de la dureté de la colle en fonction de la température et de l'humidité pour fixer la dureté à atteindre au temps «t». Normalement, il faut atteindre une **dureté Shore D de 80,** visée par la norme **NF EN ISO 868,**
- l'homogénéité du matériau mis en œuvre (mortier ou béton) et l'absence de vides à l'interface avec le support. Le contrôle au marteau est à compléter par des essais au scléromètre, par ultrasons, par carottage… déjà cités ci-dessus,
- l'adhérence au support par l'essai d'arrachement. Se reporter à l'essai n°35 et à la norme **NF EN 1542,**
- etc.

5.4.3.4.5 Contrôles d'exécution dans le cas d'une injection de l'interface entre le produit de réparation ou de renforcement et le béton support

Se reporter **au FASCICULE N°3 [FABEM].**

5.4.3.4.6 Contrôles d'exécution dans le cas d'une injection ou d'un remplissage de fissures ou de vides du béton

Se reporter **au FASCICULE N°3 [FABEM].**

5.4.3.4.7 Contrôles d'exécution dans le cas de scellement d'armatures de béton armé

Se reporter **au FASCICULE N°7 [FABEM].**

> Les principaux contrôles d'exécution pendant l'opération portent sur les points suivants :

- l'état du support et sa géométrie (surfaces horizontales, verticales ou en sous-face),
- les dimensions, la propreté et la rugosité des trous,
- l'absence de vibrations ou un niveau de vibrations acceptable,
- l'ouvrabilité du coulis dans le cas des trous sensiblement verticaux ouverts vers le haut. Se reporter à la norme **NF EN 13395-2,**
- la consistance du mortier (trous horizontaux ou en sous-face). Se reporter à la norme **NF EN 13395-1, NF EN 13395-2 et NF EN 13395-4,**
- la durée pratique d'utilisation du produit (cas des PC). Se reporter à la norme **NF P 18-810,**
- le remplissage des trous avant la mise en place de la barre,

- le maintien des barres pendant le durcissement du matériau,
- la cure pour les produits à base de liants hydrauliques,
- etc.

> Les principaux contrôles d'exécution après l'opération portent sur les points suivants :

- le remplissage (aspect, absence de retrait),
- la dureté Shore D sur les produits à base de résines synthétiques. Se reporter à la norme **NF EN ISO 868,**
- en cas de doute, un essai d'arrachement. Se reporter à la norme provisoire **NF EN 1881,**
- etc.

5.4.3.4.8 Contrôles d'exécution dans le cas de calages d'éléments

Rappel, trois techniques de mise en place du produit ou du système de calage sont possibles : coulage d'un coulis fluide, injection d'un coulis fluide et matage d'un mortier sec.

> Les principaux contrôles d'exécution pendant l'opération portent sur les points suivants :

- se reporter à la mise en place d'un mortier ou d'un béton par injection ci-dessus, qui liste les contrôles à effectuer,
- l'ouvrabilité du coulis mis en place par coulage ou injection. Se reporter à la norme **NF EN 13395-2,**
- la consistance du mortier sec mis en place par matage. Se reporter à la norme **NF EN 13395-1, NF EN 13395-2 et NF EN 13395-4,**
- la durée pratique d'utilisation du produit (cas des PC). Se reporter à la norme **NF P 18-810,**
- l'évolution de la dureté Shore D sur des éprouvettes pour les produits à base de résines synthétiques,
- etc.

> Les principaux contrôles d'exécution après l'opération portent sur les points suivants :

- le remplissage (aspect, absence de retrait de fissures),
- la dureté Shore D sur les produits à base de résines synthétiques. Se reporter à la norme **NF EN ISO 868,**
- l'évolution des déformations et du comportement à la mise en charge et au-delà,
- la résistance à la compression de carottes prélevées sur un élément témoin en cas de doutes sur la qualité de l'exécution,
- etc.

5.4.3.4.9 Contrôles d'exécution dans le cas de la mise en œuvre d'armatures passives additionnelles internes au béton

Se reporter au **DTU 21** et **au fascicule 65A** et à **l'annexe n°3** au présent guide en cas d'utilisation d'armatures en acier inoxydable ou à base de composites. Des contrôles particuliers sont à effectuer en cas de soudure ou manchonnage.

5.4.3.4.10 Contrôles d'exécution dans le cas de collages d'armatures passives extérieures au béton

Se reporter **au FASCICULE N°7 [FABEM].**

5.4.3.4.11 Contrôles d'exécution dans le cas d'un l'ajout de forces par précontrainte additionnelle

Se reporter **au FASCICULE N°8 [FABEM].**

5.4.3.4.12 Contrôles d'exécution dans le cas d'un l'ajout de forces par déformations imposées

Se reporter **au FASCICULE N°8 [FABEM].**

5.4.3.5 Contrôles d'exécution dans le cas de la restauration ou de la conservation de la passivité des armatures

5.4.3.5.1 Contrôles d'exécution dans le cas du remplacement d'un béton carbonaté ou pollué ou d'une augmentation du recouvrement des armatures pour apporter des alcalins et/ou augmenter la résistivité du béton

Se reporter aux articles 5.4.3.4.2 ci-dessus qui traitent de la mise en place de produits ou systèmes en faibles épaisseurs et des contrôles à effectuer (sans oublier les contrôles à effectuer lors du traitement des armatures).

5.4.3.5.2 Contrôles d'exécution dans le cas de traitements électrochimiques

5.4.3.5.2.1 Cas de la déminéralisation et de la ré-alcalinisation

> Les principaux contrôles d'exécution pendant l'opération portent sur les points suivants :

Il n'a pas été jugé utile de lister les contrôles à effectuer pendant le déroulement des opérations et ce, pour les raisons suivantes :

- le fascicule de documentation **FD CEN/TS 14038-1** décrit dans le détail les contrôles à effectuer lors **d'une ré-alcalinisation à courant imposé.** Un résumé des contrôles figure dans l'article 4.3.3.4.2 ci-dessus consacré à cette méthode ;
- ce même article décrit les contrôles à effectuer dans le cas d'une déminéralisation à courant imposé ;
- dans le cas où il s'agit de méthodes basées sur des anodes actives, les contrôles sont à élaborer en fonction de la notice technique de l'entreprise détentrice du procédé. Le programme des contrôles est proposé par **l'entrepreneur** à l'acceptation **du maître d'œuvre.**

> les principaux contrôles d'exécution après l'opération portent sur les points suivants :

- en cas de déminéralisation, le dosage en chlorures au voisinage des armatures, qui doit rester inférieur au seuil admis pour éviter la corrosion des armatures, en appliquant les procédures **ASTM[876-91]** ou **RILEM[TC 154-EMC],**
- en cas de ré-alcalinisation, la mesure du pH sur des carottes prélevées in situ. Se reporter à la norme **NF EN 14630.** L'épaisseur du béton ré-alcalinisé autour des armatures doit au moins être de 10 mm,
- etc.

Rappel : après ces opérations, un revêtement de protection est à mettre en œuvre. Pour les contrôles d'exécution correspondants, il faut se reporter au GUIDE N°4 [FABEM].

5.4.3.5.2.2 Cas de la prévention ou de la protection cathodique

> Il n'a pas été jugé utile de lister ici les contrôles à effectuer pendant le déroulement de l'opération et après celle-ci, c'est-à-dire durant la durée de fonctionnement de l'installation et ce, pour la raison suivante :

- **la norme NF EN 12696** décrit dans le détail les contrôles à effectuer lors **d'une prévention ou d'une protection cathodique à courant imposé.** Un résumé des contrôles figure dans l'article 4.3.3.4.4 ci-dessus consacré à cette méthode ;

Rappel de trois points importants :

- le respect des seuils de résistivité pour les produits de réparation du béton localement dégradé,
- l'intensité du courant à appliquer, qui est beaucoup plus faible dans le cas d'une démarche de prévention que dans celle d'une protection,
- l'importance à apporter **aux opérations de contrôle et de maintenance** pendant toute la durée d'exploitation de l'installation.

Dans le cas où il s'agit de méthodes basées sur des anodes actives, ou si la technique proposée diffère par trop de celle à courant imposé visée ci-dessus, les contrôles sont à élaborer en fonction des exigences de la norme **NF EN 12696** et de la notice technique de l'entreprise détentrice du procédé. Le programme des contrôles est proposé par **l'entrepreneur** à l'acceptation **du maître d'œuvre.**

5.4.3.5.3 Contrôles d'exécution dans le cas de la mise en œuvre de revêtements actifs ou non sur des armatures de béton armé

> Les principaux contrôles d'exécution pendant l'opération portent sur les points suivants :

- la mise en œuvre du produit sur la totalité de la surface des armatures décapées sans déborder sur le béton,
- l'épaisseur de produit mis en œuvre avec l'aide d'une pige ou d'une jauge à peigne ou à roue dentée,

- la durée pratique d'utilisation (DPU) pour les produits à base de résines synthétiques. Se reporter à la norme **NF P 18-810,**
- l'évolution de la dureté Shore D sur les produits à base de résines synthétiques. Se reporter à la norme **NF EN ISO 868,**
- etc.

> Les principaux contrôles d'exécution après l'opération portent sur les points suivants :

- l'aspect des armatures (continuité et épaisseur du feuil mis en œuvre et durci). La mesure de l'épaisseur du feuil sec peut se faire par la méthode du micromètre (norme **NF T 30-121**), du comparateur (norme **NF T 30-122**), la méthode du microscope (norme **NF T 30-123**) et les méthodes du microscope (norme **NF T 30-124**). Pour mesurer l'épaisseur du feuil frais, il faut consulter la norme **NF T 30-125.**
- la dureté Shore D sur les produits à base de résines synthétiques au bout de 7 jours. Se reporter à la norme **NF EN ISO 868,**
- etc.

5.4.3.5.4 Contrôles d'exécution dans le cas de la mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion sur béton

Rappel : ces produits restent pour le moment dans le cadre d'applications expérimentales.

> Les principaux contrôles d'exécution pendant l'opération portent sur les points suivants :

- les dosages appliqués au m^2 de surface en conformité avec le fiche technique et la procédure. Le dosage à appliquer doit tenir compte de l'épreuve de convenance au cours de laquelle la teneur en produit actif au droit des armatures a été contrôlée,
- la régularité de l'application sur toutes les zones y compris les zones repiquées,
- le rinçage soigné après pénétration du produit avant la réalisation des réparations des zones dégradées,
- etc.

> Les principaux contrôles d'exécution après l'opération portent sur les points suivants :

- la concentration en produit actif au niveau des armatures à partir de carottes prélevées sur l'ouvrage. Le seuil spécifié par le fabricant doit au moins être atteint.
- l'évolution dans le temps de la teneur en produit au niveau des armatures,
- le suivi dans le temps de l'efficacité du traitement par des mesures du potentiel d'électrode ou de vitesse de corrosion,
- etc.

5.4.3.5.5 Contrôles d'exécution dans le cas d'une réinjection de conduits de précontrainte

Se reporter **au FASCICULE N°8 [FABEM].**

La réception des travaux, dans le cadre de la législation en vigueur, obéit aux exigences **du maître de l'ouvrage,** qui en fixe la consistance et le calendrier **dans le marché.**

À la fin des travaux, **l'entrepreneur** remet **au maître d'œuvre** l'ensemble des essais réalisés ainsi que l'ensemble du documents **du PAQ,** même si **le marché** a prévu qu'une photocopie de ces documents soit remise **au maître d'œuvre** au fur et à mesure de l'exécution (facilité d'organisation du contrôle extérieur et sauvegarde de sécurité des documents).

Parmi les documents, doivent figurer les plans sur lesquels toutes les réparations doivent avoir été reportées, ainsi que les résultats des essais effectués et interprétés.

Si **les travaux** concernent **la restauration du béton** combinée, le plus souvent, à **une préservation ou une restauration de la passivité des armatures,** le tout en appliquant une ou plusieurs des méthodes développées dans le présent guide, **il n'est pas nécessaire de faire d'essais particuliers lors de la réception des travaux,** puisque qu'une surveillance continue des travaux a, normalement, été opérée. Le cas de **la protection cathodique** est à réserver.

En effet, si les travaux comportent une **prévention ou une protection cathodique, la réception des travaux** est liée aux résultats positifs de **l'évaluation de la performance initiale.** De plus, **le marché** doit définir les conditions dans lesquelles **le suivi de l'installation** doit être réalisé et qui en est chargé.

Si les travaux concernent un **renforcement structural** combiné, si nécessaire, à **une préservation ou une restauration de la passivité des armatures, la réception des travaux** nécessite de vérifier que le renforcement participe effectivement à la reprise des efforts. **Le marché** doit donc spécifier les essais à effectuer pour en apporter la preuve. Par exemple, pour l'ajout de forces par précontrainte additionnelle, **le GUIDE N°8 [FABEM]** explicite les essais permettant de valider le renforcement.

Photo n° 132

pont avant

et après

travaux de restauration

Photo n° 133 : défauts d'exécution

6 Hygiène et sécurité

6.1 Rappel des obligations
6.2 Cas d'un chantier de réparation de béton dégradé

6.1 Rappel des obligations

L'entrepreneur doit s'assurer du respect de la législation du travail en matière d'hygiène et de sécurité.

> Le Code du Travail impose une coordination des travaux dans les deux cas suivants :

- intervention pour travaux d'une entreprise dite extérieure dans l'établissement d'une autre entreprise dite utilisatrice. C'est le chef de l'entreprise utilisatrice qui assure la coordination générale ;
- chantier temporaire ou mobile où interviennent au moins deux entreprises. Un coordonnateur de sécurité et de protection de la santé (coordonnateur SPS) est requis sur le chantier.

> Le coordonnateur SPS est au moins de niveau 2 si les travaux effectués peuvent être qualifiés de dangereux :

- utilisation de substances extrêmement ou facilement inflammables, toxiques ou nocives ;
- risques de chutes de plus de 3 m de hauteur ;
- travaux en milieu confiné ;
- travaux nécessitant l'utilisation d'équipements de travail auxquels est applicable l'article R 233-9 du Code du Travail **(équipements de protection individuelle ou ÉPI) ;**
- travaux exposant à un niveau d'exposition sonore quotidienne supérieure à 90 dB (A) ou à un niveau de pression acoustique de crête supérieure à 140 dB ;
- travaux de démolition ;
- etc.

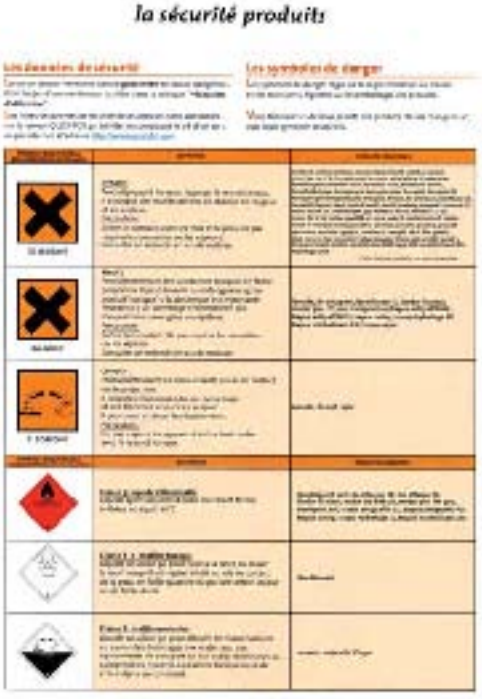


Figure n° 44 symboles de danger (extrait d'un document Weber et Broutin)

Le présent texte ne traite que des dispositions à mettre en œuvre pour assurer la protection des personnes lors de la réalisation des travaux. Il ne traite pas des installations de chantier ni des moyens d'accès (échafaudages, nacelles automotrices…), même si ces points sont évoqués dans le présent document. **Se reporter au GUIDE GÉNÉRAL (GUIDE N°0) qui traite du chantier de réparation dans son ensemble et des textes de référence.**

Certains composants utilisés lors des travaux **sont toxiques** (diluants réactifs des résines époxydiques, solvants, constituants des polyuréthannes, etc.), **corrosifs** (liants minéraux à base de silicates, ciments, liants organiques de nature basique, etc.) ou encore **inflammables** (solvants, etc.).

> La fiche technique d'un matériel ou d'un produit indique quelles sont les précautions à prendre afin d'éviter des accidents, des intoxications. Les précautions, à caractères général, qui suivent sont applicables quelles que soient les méthodes de réparation mises en œuvre :

- toutes les substances dangereuses doivent être munies d'un étiquetage réglementaire conformément à la réglementation en vigueur **(arrêté ministériel du 20 avril 1994 modifié par les arrêtés du 7 janvier 1997 et du 4 août 2005** [ce dernier arrêté transposant la directive européenne 2004/73/CE du 29 avril 2004, qui correspond à la 29ème adaptation de la directive 67/548/CEE]).
- **le Plan Général de Coordination (PGC),** le chantier étant au moins de **la catégorie 2,** doit faire mention des risques liés à l'utilisation des différents produits, dont les fiches de données de sécurité **(FDS)** doivent être obligatoirement fournies ;
- les dispositifs de protection sont choisis en fonction des recommandations des fiches de données de sécurité ;
- dans les lieux confinés, **la protection est réalisée préférentiellement de façon collective** avec mise en place d'une ventilation forcée avec arrivée d'air frais non pollué et extraction des vapeurs dangereuses. De plus, des capteurs étalonnés sont à mettre en place pour suivre dans l'atmosphère du chantier les concentrations des divers produits nocifs utilisés ;
- dans les autres lieux ou lorsque la mise en œuvre d'une protection collective s'avère impossible, les intervenants doivent être munis d'un équipement de protection individuelle adaptée :
  - appareils respiratoires filtrants à ventilation assistée avec masques et demi-masques ou avec cagoules,
  - appareils isolants non autonomes à air libre ou à adduction d'air comprimé…
- à ces équipements de protection contre les vapeurs nocives, il faut ajouter des vêtements de protection jetables, des gants de protection et des lunettes contre les projections, etc.;
- en cas d'utilisation de produits inflammables, ceux-ci sont mis en œuvre en respectant scrupuleusement les précautions d'emploi pour éviter tout risque d'incendie ;
- le personnel doit être informé et sensibilisé aux risques liés à l'utilisation de certains produits et aux mesures de protection à prendre individuellement et/ou collectivement
- le médecin du travail doit être informé que les salariés sont exposés à certains produits afin qu'il puisse assurer une surveillance médicale renforcée (SMR) ;
- etc.

6.2 Cas d'un chantier de réparation de béton dégradé

> Des précautions particulières sont à appliquer au cours de certaines opérations. Par exemple :

- la préparation du support béton et des armatures nécessite de tenir compte :
  - des poussières et des projections lors d'un «sablage» à sec,
  - des projections, du bruit et du jet d'eau lors d'un décapage à l'eau sous haute pression,
  - du risque d'effondrement de la structure si les armatures doivent être dégagées sur de grandes longueur… ;
- les traitements électrochimiques à courant imposé nécessitent de tenir compte des risques électriques ;
- l'ajout de forces par précontrainte additionnelle implique le recours à un personnel spécialisé connaissant les risques spécifiques liés à la mise en tension d'armatures de précontrainte…

Photo n° 134 : équipements de protection individuelle (crédit photo D. Poineau)

L'entrepreneur doit organiser son chantier de façon à protéger les personnes collectivement ou, si cela est impossible, individuellement.

Nota :

- *la liste des normes relatives aux différents dispositifs de protection est donnée en annexe au* ***GUIDE GÉNÉRAL (GUIDE N°0) ;***
- *l'Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics ou OPPBTP édite des fiches et des guides de sécurité et présente les bonnes pratiques de sécurité sur son site SPOTH-BTP[67]. Il peut également être consulté. Adresse : Tour Amboise 204 rond-point du Pont-de-Sèvres 92516 Boulogne-Billancourt.*
- *des recommandations pour la prévention, l'hygiène et la sécurité lors de la projection des mortiers et bétons est disponible sur le site : www.asquapro.asso.fr.*

[67] *www.spoth-btp.fr*

7

Gestion des déchets du chantier[68]

68 Consulter le guide de la FNTP de 2005 intitulé : les principes de gestion des déchets de chantier.

7.1 Rappel des obligations
7.2 Cas d'un chantier de réparation de béton dégradé

Un chantier est considéré comme **une installation classée** s'il peut présenter des dangers ou des inconvénients pour la commodité du voisinage, la santé, la sécurité, la salubrité publique, l'agriculture, la protection de la nature et de l'environnement. Cette installation est soumise **à autorisation ou à déclaration** suivant la gravité des dangers ou des inconvénients qu'elle présente.

Les contraintes sont imposées par des lois et décrets qui sont regroupés dans **le Code de l'Environnement**[69] (se reporter au GUIDE GÉNÉRAL [GUIDE N°O]) qui traite en détail de la gestion des déchets et donne les textes de référence).

Figure n° 45 : extrait d'une fiche de données de sécurité (FDS) de la société Parexlanko

L'entrepreneur doit demander avant tout début des travaux **les autorisations nécessaires de démarrage des travaux et les certificats d'acceptation préalable pour les déchets dangereux (DIS).** Il doit tenir compte des sujétions liées à la récupération, au transport et au traitement de tous les déchets générés par les travaux.

[69] *Consulter le site : www.legifrance.gouv.fr.*

> Il est rappelé que les déchets industriels sont répartis en trois classes :

- Classe I, les déchets industriels spéciaux (DIS) : déchets considérés comme dangereux (par exemple, des déchets contenant des solvants organiques nocifs) ;
- Classe II, les déchets industriels banals (DIB) : déchets considérés comme non dangereux (par exemple, des emballages non souillés) assimilables à des déchets ménagers et pouvant être traités dans les mêmes filières ;
- Classe III, les déchets industriels inertes (par exemple, des abrasifs pour la préparation d'un support non utilisés, des morceaux de béton…).

Le décret 2002-540 du 18 avril 2002 donne la liste des déchets. Certains d'entre eux sont **considérés comme dangereux** (marqués par un astérisque) s'ils contiennent **des concentrations** (pourcentage en poids) **suffisantes de certaines substances** listées dans l'annexe 1 du présent décret.[70]

> L'élimination des déchets comporte deux filières :

- l'élimination proprement dite dans des installations d'élimination des déchets par mise en décharge ou par incinération ;
- la valorisation des déchets par tri, recyclage et réutilisation, soit sur place, soit hors du chantier, soit en centre spécialisé.

> L'élimination des trois catégories de déchets :

- cas des déchets de classe I (les déchets industriels spéciaux ou DIS, dangereux) :
  - les DIS sont éliminés dans des installations, soit de stockage, soit d'incinération autorisées,
  - ils sont soumis à **une traçabilité** de leur origine à leur destination au moyen **d'un bordereau de suivi des déchets industriels** (BSDI),
  - ils doivent recevoir **un certificat d'acceptation préalable** du gestionnaire de l'installation d'élimination des déchets avant de pouvoir être déposés dans celle-ci,
  - **ils sont contrôlés** lors de leur admission dans l'installation d'élimination des déchets afin de vérifier s'ils sont bien conformes **aux déchets autorisés** dans cette installation ;
- cas des déchets de classe II (déchets industriels banals ou DIB) :
  - les déchets d'emballages industriels ou commerciaux peuvent être soumis à l'obligation de valorisation si les quantités de déchets produites sont importantes (>1 100 litres/semaine),
  - les autres déchets DIB, s'ils ne sont pas valorisés, sont éliminés dans des installations, soit de stockage, soit d'incinération autorisées ;
- cas des déchets de classe III (les déchets industriels inertes) :
  - les déchets industriels de classe III, s'ils ne sont pas valorisés, sont stockés dans une décharge de classe III autorisée.

[70] Consulter les pages 7074 à 7088 du Journal Officiel (JO) n°93 du 20 avril 2002.

7.2 Cas d'un chantier de réparation de béton dégradé

Certains composants utilisés lors des travaux de traitement de surfaces **sont toxiques** (diluants réactifs de résines époxydiques, solvants, constituants des polyuréthannes, etc.), **corrosifs** (liants minéraux à base de silicates, ciments, liants organiques de nature basique, etc.) ou encore **inflammables** (solvants, etc.). Ils peuvent donc être considérés comme dangereux et relever de la catégorie des déchets industriels spéciaux (DIS).

> Même lorsque cela n'est pas imposé par la réglementation, un maître d'ouvrage a intérêt à évaluer les types de déchets que l'ensemble des opérations de réparation ou de renforcement de son ouvrage (par exemple, lors de la préparation du support) va générer, sachant que certains des déchets peuvent provenir de l'ouvrage existant (produits de démolition) et d'autres des travaux. Cela peut permettre :

- d'une part, d'éviter **des surprises désagréables en cours de travaux,** comme la découverte de produits amiantés ;
- d'autre part, aux clauses **du marché,** de prendre en compte la gestion des déchets et, si possible, de leur valorisation sous forme de clauses environnementales. De telles clauses sont autorisées par le Code des Marchés Publics.

L'entrepreneur, lors **du choix des produits,** se doit de proposer **au maître d'œuvre,** parmi ceux utilisables, c'est-à-dire ayant la même efficacité globale (propriétés mécaniques et chimiques, facilité de mise en œuvre et coût), ceux qui sont **les moins dangereux pour la santé du personnel qui les utilise et qui sont les moins polluants** pour l'environnement.

Il faut noter qu'en matière d'hygiène et de sécurité, les normes de produits ne traitent que de généralités et de principes. Les normes de la série **NF P 95-1**** renvoient à l'étiquetage et celles de la série **NF EN 1504-**** à l'avertissement de **l'article ZA1 de l'annexe ZA,** qui renvoie au site **EUROPA.**[71]

L'entrepreneur se doit d'organiser son chantier pour faciliter le tri des déchets. En effet, par exemple, le mélange de déchets de catégories différentes peut conduire à classer la totalité des déchets en DIS, dont le coût de traitement est très supérieur à celui des deux autres catégories.

Il est donc nécessaire de bien identifier les méthodes et les techniques utilisées lors de travaux de restauration du béton ou de renforcement structural, qui génèrent les volumes les plus importants de déchets appartenant aux trois classes. Il convient de citer :

- les techniques de préparation du support et des armatures qui génèrent :
  - des déchets de diverses classes lors de l'enlèvement des revêtements existants,
  - des mélanges de matériaux, les uns issus de la structure (débris de béton, poussières…) et les autres de la technique utilisée (par exemples, des abrasifs minéraux ou métalliques lors d'un «sablage» à sec ou de l'eau chargée de débris lors d'une hydro-démolition) ;
- les techniques de projection de mortiers ou de bétons, surtout par voie sèche, qui génèrent, à cause des rebonds, des déchets inertes en fortes quantités ;
- les collages et les injections à l'aide de produits à base de résines de synthèses, qui peuvent générer des DIS ;
- les traitements électrochimiques, comme la déminéralisation et la ré-alcalinisation, qui produisent des volumes importants de cellulose à recycler…

[71] *http : /europa.eu.int/comm/enterprise/construction/internal/dangsub/dangmain.htm.*

8

Fiche synthétique du PAQ

La réalisation de travaux de mise en œuvre d'un produit ou d'un système pour la restauration du béton et/ou le renforcement structural combinés avec une restauration ou une préservation de la passivation des armatures comporte plusieurs opérations enchaînées les unes aux autres. Chaque opération peut faire l'objet **d'une procédure et d'un cadre de document de suivi,** mais tous ces différents documents peuvent être regroupés dans **une procédure d'exécution principale** (par exemple, la procédure de remplacement du béton carbonaté ou pollué…) et **un cadre des documents de suivi d'exécution principal.**

> Il est rappelé que le marché fixe, en s'inspirant des dispositions du présent guide :

- les stipulations (prescriptions de moyens et spécifications de produits) à respecter, ainsi que la consistance des essais et contrôles. Ces obligations sont reprises dans **les procédures et les cadres des documents de suivi ;**
- ce qui relève des contrôles interne, extérieur voire externe ;
- un cadre de **PAQ** avec la liste minimale des procédures et des cadres de documents de suivi à fournir ;
- le calendrier et les conditions de présentation **au maître d'œuvre** des différents documents constituants le **SOPAQ et le PAQ** au fur et à mesure du déroulement de l'opération chantier (de la remise des offres à la signature du marché et de la période de préparation des travaux à leur réception)[72].

Figure n° 46 : guide du STRRES 2000 relatif à la rédaction des PAQ en réparation

[72] Le schéma de l'assurance qualité sur le chantier de la page 13 du guide de rédaction d'un PAQ du STRRES donne dans le détail ***les actions qualité à entreprendre et le calendrier à respecter.***

La présente fiche complète, en tant que de besoin et en tenant compte des stipulations du présent **guide, la fiche de reprise du béton dégradé du guide de 2000 du STRRES** relative à la rédaction d'un Plan d'Assurance de la Qualité (PAQ).

Bien entendu, cette fiche très générale doit être adaptée à la méthode de réparation et/ou de renforcement à mettre en œuvre. Par exemple, la fiche sur le remplacement du béton carbonaté ou pollué diffère fortement de celle sur une protection cathodique.

Il est possible de consulter également, d'une part, **le guide de décembre 1991, SETRA, SNCF, TP de France et SNBATI : Mise en œuvre des Plans d'Assurance de la Qualité – Exécution des ouvrages en béton armé et précontraint** et, d'autre part, **le fascicule 65A** du CCTG.

REPRISE DU BÉTON DÉGRADÉ
Points sensibles, critiques et d'arrêts

Rep	Description des phases d'exécution	Intervention du contrôle interne			Intervention du contrôle externe à l'entreprise (1)	Intervention du contrôle extérieur (2)
		Points sensibles (3)	Points critiques (4)	Points d'arrêts (5)		
1	PAQ, pendant le période de préparation des travaux : mise au point du document d'organisation générale et établissement des documents suivants : **o les procédures d'exécution ;** **o les cadres des documents de suivi**		Oui			Oui
2	PAQ, avant toute réalisation d'une opération : mise au point des procédures d'exécution et des cadres des documents de suivi correspondants		Oui	Oui		Oui
3	PAQ, pendant la réalisation d'une opération : respect des procédures, renseignement des documents de suivi et information du maître d'œuvre (6)		Oui			Oui
4	**Choix des produits et des matériels**					
	La consultation fixe la famille du produit et les caractéristiques à respecter, voire une technique d'exécution — L'entrepreneur propose une ou des solutions - **Le marché** entérine la ou les solutions. (7)					
	Une épreuve d'étude est nécessaire pour choisir le produit lorsque les exigences à satisfaire sortent du domaine d'emploi de la norme (8)		Oui	Oui		Oui
5	**Contrôle et réception des produits**					
	Transport, réception et stockage		Oui	Oui		Oui
	Essais d'identification rapide et/ou contrôle des caractères normalisés		Oui	Oui		Oui
6	**Relevé contradictoire de l'état du support**		Oui			Oui
7	**Épreuve de convenance de préparation du support**					
8	**Épreuve de convenance d'une opération**					
	Préparation générale de l'épreuve (documents nécessaires et organisation de l'ensemble des opérations)		Oui			Oui
	Préparation du support (béton et armatures)		Oui			Oui
	Préparation des produits		Oui			Oui
	Réalisation de l'épreuve		Oui			Oui
	Après réalisation de l'épreuve		Oui			Oui

REPRISE DU BÉTON DÉGRADÉ Points sensibles, critiques et d'arrêts						
Rep	**Description des phases d'exécution**	**Intervention du contrôle interne**			**Intervention du contrôle externe à l'entreprise (1)**	**Intervention du contrôle extérieur (2)**
		Points sensibles (3)	**Points critiques (4)**	**Points d'arrêts (5)**		
9	**Contrôles d'exécution d'une opération**					
	Préparation du support (béton et armatures)		Oui			Oui
	Préparation de l'opération		Oui			Oui
	Préparation des produits		Oui			Oui
10	**Levée du point d'arrêt avant travaux**					
	Réalisation de l'opération (mise en œuvre des produits)		Oui			Oui
	Après réalisation de l'opération		Oui	Oui		Oui
(pm)	Travaux complémentaires (injection, collage, revêtement de protection…)	Reprendre la présente fiche à partir de la tâche n°2				
11	**Réception des travaux**					
	Remise des résultats des essais		Oui			Oui
	PAQ : remise au maître d'œuvre de l'ensemble des documents originaux constituants le PAQ		Oui	Oui		Oui
	Vérifications diverses					Oui

Tableau n° 39 : liste des points sensibles, critiques et d'arrêt, relative à une opération de reprise d'un béton dégradé

LÉGENDE :

(1).il s'agit d'une surveillance et assistance du contrôle interne effectuée par un représentant indépendant de la direction du chantier. Il doit être prévu ***au marché.***

(2).il s'agit ***du maître d'œuvre*** *du client (voire du client) ou d'un organisme habilité par lui (laboratoire ou bureau d'études).*

(3). ***un point sensible*** *est un point de l'exécution qui doit particulièrement retenir l'attention. Dans le présent tableau, l'ensemble des points sensibles n'a pas été développé.*

(4). ***un point critique*** *est un point de l'exécution qui nécessite une matérialisation du contrôle interne sur un document de suivi d'exécution ainsi qu'une information préalable du contrôle extérieur pour que ce dernier puisse effectuer son contrôle, s'il le juge nécessaire. L'intervention du contrôle extérieur n'est pas indispensable à la poursuite de l'exécution.*

(5). ***un POINT D'ARRÊT*** *est un point critique pour lequel un accord formel du maître d'œuvre (ou d'un organisme habilité par lui) est nécessaire à la poursuite de l'exécution. Les délais de préavis et les délais de réponse du maître d'œuvre sont fixés dans le marché ainsi que les dispositions à prendre à l'issu du délai de réponse en l'absence de réaction du maître d'œuvre (situation très anormale). Les points d'arrêt doivent être prévus au marché.*

(6). ***le marché*** *peut prévoir qu'un double (photocopie) des documents de suivi renseignés soit remis* ***au maître d'œuvre*** *au fur et à mesure du déroulement des travaux (une facilité pour le contrôle extérieur). Il est rappelé que l'ensemble des documents originaux constituants le PAQ doit être remis* ***au maître d'œuvre*** *au moment de la réception des travaux.*

(7).ce point recouvre les périodes de préparation du projet, de consultation des entreprises, de jugement des offres, de mise au point et de signature du marché.

(8).si cette épreuve est prévue ***au marché.***

A. DANS LE DOMAINE DES OUVRAGES D'ART

[1] LCPC : La nomenclature des parties des ouvrages d'art en béton armé, précontraint et en maçonnerie éditée en 1976 ;

[2] MEL : Les fascicules de la seconde partie de l'instruction technique sur la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art du Ministère de l'Équipement (par exemple, le fascicule n°31 relatif aux ponts en béton non armé et en béton armé, le fascicule n°32 relatif aux ponts en béton précontraint, le fascicule n°12 relatif aux appuis (piles et culées)...) ;

[3] MEL : Les guides d'évaluation des ouvrages (ponts et murs de soutènement) par la méthode IQOA du Ministère de l'Équipement complétés par des documents contenus dans la valise de formation ;

[4] LCPC : Le guide technique relatif aux défauts apparents des ouvrages en béton de 1973;

[5] LCPC : Le guide technique relatif aux défauts apparents des parements en béton de 1991;

[6] ENPC : Maintenance et réparation des ponts (désordres et leurs origines, méthodes d'auscultation, techniques de réparation...) – Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (1997) ;

[7] LCPC : Le manuel méthodologique de 1999 du LCPC relatif à l'identification des réactions de dégradation interne du béton dans les ouvrages d'art ;

[8] Rapport franco-britannique : Post-tensionned concrete bridges – Ponts en béton précontraint par post-tension – Rapport franco-britannique sur l'état de l'art (historique, inventaire, problèmes, méthodes d'investigation, méthodes de réparation et conclusions) – édition Thomas Telford à Londres en 1999 ;

[9] LCPC : Le guide technique de surveillance et d'auscultation des VIPP (viaducs à travées indépendantes à poutres préfabriquées post-contraintes) de 2000 ;

[10] LCPC : Le guide méthodologique de 2003 relatif à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne ;

[11] Christian Crémona : Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants – Ponts - Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (2003) ;

[12] Rapport franco-britannique : Management of bridges – Gestion des ponts - Rapport franco-britannique sur l'état de l'art (inventaire, inspection auscultation, évaluation des ponts (force portante)...), – édition Thomas Telford à Londres (2005).

B. DANS LE DOMAINE DU BÂTIMENT

[13] ITBTP : La pathologie des murs de soutènement – Série gros œuvre n°10 des Annales de l'ITBTP ;

[14] ITBTP : La pathologie des toitures–terrasses et des ouvrages enterrés - Série gros œuvre n°11 des Annales de l'ITBTP ;

[15] ITBTP : Les toitures–terrasses pathologie du gros œuvre - Série gros œuvre n°19 des Annales de l'ITBTP ;

[16] ITBTP : La pathologie des constructions en béton armé – Série gros œuvre n°23 des Annales de l'ITBTP ;

[17] Frédéric Offeinstein : Compatibles incompatibles ou comment associer les matériaux de construction – Éditions du Moniteur 1987 ;

[18] CD-Rom édité par la SMABTP sur la prévention des désordres dans le domaine du bâtiment (2003) ;

[19] Sites internet : Fiches sur les pathologies, les sinistres et la prévention des désordres disponibles sur certains sites tels que : www.cstb.fr, www.smabtp.fr, www.qualiteconstruction.com, www.bienconstruire.com…

C. DANS LE DOMAINE DE L'AUSCULTATION :

[20] ITBTP : Moyens modernes de contrôle non destructif et in situ - Série essais et mesures n°172 des Annales de l'ITBTP ;

[21] ITBTP : Évaluation de la qualité des bâtiments et de leurs équipements par des méthodes non destructives - Série essais et mesures n°178 des Annales de l'ITBTP ;

[22] AFGC-CEFRACOR : La réhabilitation de béton armé dégradé par la corrosion – Guide AFGC-CEFRACOR de 2003 ;

[23] AFGC COFREND : La méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton – Guide AFGC et COFREND de 2005.

Photo n° 135 : guide AFGC-COFREND de 2005 (crédit photo AFGC- COFREND-Presses ENPC)

D.DIVERS (consulter les sites)

[24] Bibliothèques : ENPC, ENTPE, ESTP…

[25] Éditeurs : Dunod, Eyrolles, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, éditions du Moniteur…

A

Agrément Technique Européen 199

Association Française de Génie Civil - AFGC 24, 30, 31, 38, 45, 50, 64, 66, 68, 71, 75, 132, 133, 134, 137, 151, 183, 184, 197, 198, 199, 365

Association Française de Normalisation - AFNOR 24, 135, 153

Association pour la Qualité de la Précontrainte et des équipements 24, 199

Association pour la Qualité de Projection des Mortiers et Bétons 25

Association pour le Certification et la Qualification des Peintures Anticorrosion 24

Assurance de la qualité

- Contrôle extérieur 213, 300, 308, 313, 349, 361, 362
- Contrôle externe 300, 361
- Contrôle interne 300, 308, 313, 631, 362
- Documents de suivi 29, 79, 267, 300, 308, 314, 330, 331, 336, 360, 361, 362
- Levée du point d'arrêt 270, 314, 317, 330, 362
- PAQ 258, 300, 306, 308, 349, 359, 360, 361, 362
- Plan d'Assurance de la Qualité - PAQ 300, 308, 361
- Point critique 362
- Point d'arrêt 29, 210, 217, 270, 303, 308, 309, 314, 317, 330, 362
- Point sensible 362
- Procédures 29, 66, 71, 78, 79, 157, 267, 300, 308, 347, 360, 361

Schéma d'Organisation du Plan d'Assurance de la Qualité - SOPAQ 360

Avis Techniques 157, 158

B

Bâtiment 25, 26, 31, 33, 39, 48, 54, 55, 65, 76, 108, 118, 153, 157, 158, 159, 165, 170, 172, 181, 182, 183, 207, 247, 260, 265, 266, 300, 321, 323, 340, 354, 364, 365

Bétons

- À composition prescrite 182
- À hautes performances 184, 223
- À propriétés spécifiées 182
- Autoplaçants 183, 223
- Fibrés ultra performants 184, 220
- Renforcement structural 8, 10, 12, 81, 83, 84, 98, 110, 177, 187, 246, 247, 248, 268, 270, 272, 273, 280, 300, 308, 313, 318, 320, 322, 327, 330, 331, 335, 338, 339, 349, 359, 360

Bureau d'études 64, 66, 72, 362

C

CCTG

- Fascicule 4 titre II - Armatures pour constructions en béton précontraint 199
- Fascicule 65A – Exécution des ouvrages de génie civil en BA et BP 48, 158, 182, 183, 184, 199, 217, 220, 222, 223, 237, 238, 245, 247, 263, 269, 271, 280, 287, 307, 319, 321, 323, 333, 340, 346, 361

Centre Français de l'Anti-Corrosion 25, 153

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment - CSTB 25, 157

Collection technique CIMbéton
- Béton armé d'inox – Le choix de la durée de 2004 194
- Bétons et ouvrages d'art – Durabilité du béton de 2004 183

D

Déchets
- Bordereau de Suivi des Déchets Industriels 357
- Industriels Banals 357
- Industriels Inertes 357
- Industriels Spéciaux 357, 358
- Installations classées 356

Défauts et malfaçons 157

Désordres du matériau acier
- Corrosions des armatures passives ou actives 2, 140, 141, 204, 244, 250, 264, 297, 306, 324

Désordres du matériau béton
- Alcali- réaction 38, 43, 44, 45, 66, 131, 132, 134, 138, 139, 147, 151, 155, 182, 207, 240, 241, 290
- Désordres divers 2, 8, 9, 10, 16, 30, 58, 85, 86, 95, 96, 98, 99, 101, 102, 103, 104, 111, 157, 170, 179, 201, 244, 248, 250, 300, 306, 307, 360, 362
- Réaction sulfatique 38, 43, 44, 107, 155
- Réactions de gonflement interne (AR ou RSI) 40, 43, 104, 105, 155, 363

Directive du SETRA
- relative au jugement des offres 80

DTU
- Documents particuliers du marché 25, 157, 247

Durée pratique d'utilisation 174, 187, 214, 267, 275, 303, 304, 334, 343, 344, 345, 348

E

Effets thermiques et hygrométriques 25, 210

Entrepreneur 25, 28, 29, 79, 80, 148, 157, 158, 159, 166, 167, 201, 203, 206, 216, 218, 219, 220, 239, 244, 248, 250, 262, 267, 282, 290, 293, 300, 306, 308, 309, 310, 330, 333, 346, 347, 349, 352, 354, 356, 358, 361

Épreuve d'étude 155, 157, 163, 168, 173, 175, 181, 188, 200, 210, 300, 302, 304, 333, 361

Épreuve de convenance 201, 203, 206, 246, 248, 249, 267, 270, 273, 297, 300, 304, 306, 308, 310, 311, 312, 314, 320, 334, 341, 348, 361

Essais et contrôles
- Perméabilité à l'air 305, 338

Essais et contrôles 217, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 360

F

Fascicules ASQUAPRO
béton projeté 9, 82, 89, 116, 137, 141, 144, 159, 175, 177, 178, 274, 281, 320

Fascicules de documentation
FD A 35-029 ..... 193, 237
FD CEN/TS 14038-1 ..... 137, 149, 150, 202, 239, 290, 346
FD P 18-011 ..... 38, 81, 98, 101, 182
FD P 18-503 ..... 247, 338
FD P 18-802 ..... 217, 301, 302, 303, 308
FD P 18-823 261

Fédération Française du Bâtiment 25, 186, 247, 263

Fédération Nationale des Travaux Publics - FNTP 20, 283

Fiche technique 28, 215, 218, 219, 220, 221, 223, 229, 245, 264, 265, 266, 267, 269, 271, 273, 274, 275, 283, 284, 286, 287, 288, 290, 297, 303, 304, 306, 320, 321, 323, 333, 334, 337, 348, 353
Notice technique 28, 245, 273, 283
Notice d'emploi 297, 316, 346, 347

G

Génie civil 24, 26, 33, 36, 50, 157, 158, 159, 165, 170, 172, 178, 181, 182, 207, 247, 265, 266, 300, 321, 323, 340

Guide général 25, 66, 301, 353, 354, 356

Guide n°1 [FABEM] - Reprise des bétons dégradés 8, 9, 13, 246, 393

Guide n°2 [FABEM] - Traitement des fissures par Calfeutrement - Pontage et protection localisée - Création d'un joint de dilatation 9, 13, 93, 111, 117, 169, 200, 223, 248, 269, 272, 322

Guide n°3 [FABEM] - Traitement des fissures par injection 13, 93, 111, 116, 117, 163, 168, 189, 234, 235, 248, 285, 286, 322

Guide n°4 [FABEM] - Protection des bétons 13, 31, 92, 93, 169, 175, 200, 219, 220, 223, 225, 229, 242, 246, 248, 253, 265, 266, 269, 272, 277, 278, 320, 338, 347

Guide n°5 [FABEM] - Béton projeté 82, 184, 227, 321, 278, 279, 281, 320, 321, 338, 342

Guide n°7 [FABEM] – Armatures passives additionnelles 116, 125, 168, 189, 197, 234, 238, 286, 288, 321, 322, 323

Guide n°8 [FABEM] – Armatures de précontrainte additionnelles 63, 117, 127, 131, 165, 200, 206, 239, 242, 288, 289, 298, 309, 324, 326, 329, 339, 349

Guides AFNOR
GA P 18-902 ..... 135, 153

Guides de l'AFGC
Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages de 2004 ..... 45, 132, 183
Maîtrise de la durabilité de la précontrainte (à paraître) 68, 198
Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants 183
Recommandations provisoires des bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) 184
Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion de 2003 ..... 31, 38, 64, 66, 75, 137
Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites. Recommandations provisoires 197

Guides de l'Office fédéral des routes suisse
utilisation d'aciers d'armature inoxydables 194, 205

Guides méthodologiques LCPC
Aide à la gestion des ouvrages atteints de réactions de gonflement interne de novembre 2003 ..... 30, 104

Guides STRRES
Assurance de la qualité - Guide de rédaction d'un PAQ de septembre 2000 ..... 159, 220

Guides techniques du LCPC
Protection des bétons par application de produits à la surface du parement de 2002 ..... 135, 154
Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel de décembre 2003 ..... 86, 92, 182
Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne 44

Guides techniques du SETRA
Préventions des désordres dus à l'alcali-réaction – Rédaction des pièces écrites des marchés 182

Guides techniques LCPC-SETRA
Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton
d'août 1996 ..... 20, 30, 31, 159, 171

Guides techniques SETRA-SNCF-FNTP-SNBATI
Mise en œuvre des Plans d'Assurance de la qualité dans les ouvrages en béton armé et en béton précontraint
de décembre 1991 361

H

Hygiène et sécurité
Coordonnateur de Sécurité et de Protection de la Santé – Coordonnateur SPS 315, 331, 352
Dangereux 39, 352, 356, 357, 358
Fiche de Sécurité 28, 166, 167, 211, 218, 267, 315, 330, 331, 353
Plan Général de Coordination 353

Hygiène et Sécurité
Équipements de Protection Individuelle 166, 167, 254, 352, 354

J

Journal Officiel 357

L

Laboratoire 25, 29, 64, 66, 71, 74, 147, 176, 194, 210, 291, 302, 303, 304, 315, 316, 325, 331,362

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - LCPC 20, 25, 30, 37, 40, 43, 44, 68, 71, 85, 86, 87, 92, 104, 105, 107, 135, 153, 154, 159, 171, 172, 174, 182, 253, 263

Liants
Organiques 19, 82, 147, 148, 151, 169, 170, 171, 173, 179, 180, 206, 211, 219, 220, 221, 222, 225, 226, 227, 229, 230, 235, 237, 250, 258, 269, 270, 277, 293, 353, 357, 358

Liants hydrauliques
Modifiés 18, 143, 144, 146

Liants organiques
Liants polymères 20
Polyméthacrylates de méthyle 20
Résines polyuréthannes 304
Résines synthétiques 18, 26, 144, 160, 162, 171, 179, 188, 189, 191, 192, 203, 207, 209, 214, 262, 275, 279, 280, 283, 287, 303, 304, 323, 345, 348

M

Maître d'œuvre - Prescripteur - Contrôleur 2, 29, 76, 157, 158, 159, 201, 203, 206, 210, 216, 219, 220, 239, 248, 267, 270, 282, 290, 293, 301, 303, 308, 309, 310, 314, 330, 331, 333, 346, 347, 349, 358, 360, 361, 362

Maître d'ouvrage 66, 67, 75, 76, 79, 80, 155, 166, 300, 358

Manuels méthodologiques LCPC
identification des réactions de dégradation interne du béton dans les ouvrages d'art de 1999 363

Marché 7, 9, 25, 26, 28, 64, 79, 156, 157, 159, 161, 162, 163, 168, 169, 175, 182, 183, 186, 188, 189, 191, 194, 200, 205, 206, 207, 210, 212, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 239, 244, 245, 246, 247, 248, 254, 267, 270, 271, 291, 292, 298, 300, 301, 302, 303, 304, 306, 307, 308, 309, 313, 317, 319, 321, 323, 330, 332, 335, 338, 339, 347, 349, 358, 360, 361, 362

Marques de certification
AFCAB 194, 237, 287
CE 17, 24, 157, 160, 162, 168, 190, 199, 200, 212, 213, 214, 301, 302
NF 2, 8, 9, 11, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 24, 26, 71, 79, 93, 96, 111, 116, 117, 137, 144, 145, 153, 156, 157, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 169, 170, 171, 172, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 183, 184, 186, 188, 189, 190, 192, 193, 194, 198, 199, 201, 203

Marques de certification 157, 168, 200 215

Mesures du potentiel d'électrode 70, 348

Méthode d'essai
présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie 37, 68

Méthodes de mesure 68, 69, 240, 290, 325, 326, 348

Méthodologie de l'expertise 66, 67

Mode opératoire
Relevé des défauts du support 29, 246, 314

N

Normes d'essais
ISO 11357-3 164
ISO 4677-1 268
ISO 4677-2 268
NF A 09-202 337
NF EN 1015-17 ..... 178, 189
NF EN 1015-4 305
NF EN 1015-6 ..... 304, 305

NF EN 12189 343
NF EN 12190 ..... 26, 178
NF EN 12192-1 ..... 304, 305
NF EN 12192-2 304
NF EN 12350-1 340
NF EN 12350-2 340
NF EN 12390-1 338
NF EN 12390-2 338
NF EN 12390-3 338
NF EN 12390-7 338
NF EN 12390-8 338
NF EN 12504-1 338
NF EN 12504-2 338
NF EN 12614 ..... 189, 204
NF EN 12615 305
NF EN 12617-4 178
NF EN 12618-1 164
NF EN 12618-2 305
NF EN 12637-3 164
NF EN 1290 305
NF EN 13036-4 ..... 178, 338
NF EN 13057 178
NF EN 13062 305
NF EN 13294 ..... 304, 305, 334, 335
NF EN 13295 ..... 26, 178
NF EN 13395-1 ..... 334, 335, 344, 345
NF EN 13395-2 ..... 305, 334, 335, 344, 345
NF EN 13395-3 ..... 334, 335
NF EN 13395-4 ..... 164, 344, 345
NF EN 13396 164
NF EN 13412 178
NF EN 13529 164
NF EN 13584 164
NF EN 13687-1 178
NF EN 13687-2 178
NF EN 13687-3 164
NF EN 13687-4 178
NF EN 13894-1 ..... 164, 188
NF EN 13894-2 ..... 164, 188
NF EN 14117 ..... 305, 335
NF EN 14629 ..... 71, 325
NF EN 14630 ..... 71, 325, 347
NF EN 1504-8 ..... 17, 21, 162, 212, 270
NF EN 1542 ..... 26, 178, 305, 320, 337, 339, 341, 342, 344
NF EN 1544 189
NF EN 1766 ..... 26, 320
NF EN 1770 178
NF EN 1771 305

NF EN 1799 305
NF EN 1881 ..... 189, 345
NF EN 196-1 ..... 303, 305
NF EN 196-3 335
NF EN 459-1 19
NF EN ISO 2811-1 ..... 304, 305
NF EN ISO 2811-2 ..... 304, 305
NF EN ISO 2812-1 164
NF EN ISO 3219 ..... 305, 334
NF EN ISO 3274 320
NF EN ISO 4288 320
NF EN ISO 527-1 305
NF EN ISO 604 303
NF EN ISO 868 ..... 303, 305, 334, 344, 345, 348
NF EN ISO 9514 304
NF P 15-431 303
NF P 18-806 303
NF P 18-810 ..... 303, 304, 334, 343, 344, 345, 348
NF P 18-874 188
NF T 30-121 348
NF T 30-122 348
NF T 30-123 348
NF T 30-124 348
NF T 30-125 348
XP P 18-362 303
XP P 18-831 190
XP P 18-832 192
XP P 18-833 192
XP P 18-834 ..... 192, 303, 305
XP P 18-835 192
XP P 18-836 190
XP P 18-837 190
XP P 18-852 303
XP P 18-854 179
XP P 18-855 179
XP P 18-856 179
XP P 18-857 179
XP P 18-858 ..... 179, 303
XP P 18-859 179
XP P 18-860 179
XP P 18-861 179
XP P 18-862 179
XP P 18-871 188
XP P 18-872 188
XP P 18-873 188
XP P 18-891 303
XP P 18-892 303

Normes d'exécution
DTU 21 – NF P 18-201 ..... 10, 182, 183, 217, 220, 223, 230, 238, 247, 263, 269, 270, 287, 307, 319, 333, 340, 346
DTU 42.1 – NF P 84-404-1, 1/A1, 1/A2 – NF P 84-404-2, NF P 84-404-3 – FD P 84-405 ..... 157, 158, 271

Normes de la série
NF EN 1504-** 8, 153, 157, 160, 163, 169, 209, 212, 213, 217, 245, 268, 358

Normes de produits et d'essais
série P 18-8** 16, 24, 160, 300, 301, 303, 304

Normes produits
ISO 14654 193
ISO 14655 199
ISO 14656 199
NF A 35-015 193
NF A 35-016-1 193
NF A 35-016-2 193
NF A 35-017 193
NF A 35-019-1 193
NF A 35-019-2 193
NF A 35-020-1 ..... 193, 237, 287
NF A 35-020-2 193
NF A 35-021 193
NF A 35-024 193
NF A 35-027 193
NF A 35-028 193
NF A 35-030 193
NF A 35-035 198
NF EN 1008 ..... 192, 209
NF EN 10080 192
NF EN 12201-1 199
NF EN 12201-2 199
NF EN 12201-5 199
NF EN 12620 ..... 24, 207
NF EN 12636 305
NF EN 13055-1 207
NF EN 13263-1 208
NF EN 14216 ..... 207, 403
NF EN 14487-1 ..... 177, 338
NF EN 14889-1 208
NF EN 14889-2 208
NF EN 1504-1 ..... 17, 19, 171, 172
NF EN 1504-2 ..... 24, 96, 160, 163, 164, 175, 176, 177, 181, 270, 298, 305, 307
NF EN 1504-3 ..... 17, 20, 26, 160, 161, 162, 165, 169, 174, 175, 178, 180, 181, 186, 203, 294, 298
NF EN 1504-4 ..... 156, 160, 162, 186, 283, 284, 288, 337
NF EN 1504-5 ..... 93, 111, 116, 117, 160, 162, 189, 284, 286
NF EN 1504-6 ..... 160, 162, 189, 286
NF EN 1504-7 ..... 17, 21, 24, 144, 162, 204, 297, 307
NF EN 15183 204
NF EN 15184 204

NF EN 197-1 ..... 19, 24, 207
NF EN 197-2 24
NF EN 197-3 24
NF EN 197-4 ..... 24, 207
NF EN 206-1 ..... 181, 183, 184, 217, 222, 269, 270, 333, 341
NF EN 413-1 ..... 19, 207
NF EN 450-1 208
NF EN 450-2 208
NF EN 523 198
NF EN 934-2 209
NF EN 934-3 209
NF EN 934-4 209
NF EN 934-5 209
NF EN 934-6 209
NF P 15-300 207
NF P 15-301 207
NF P 15-302 302
NF P 15-306 à NF P 15-319 207
NF P 15-317 19
NF P 15-319 ..... 19, 207
NF P 18-103 abrogée 24
NF P 18-370 209
NF P 18-506 208
NF P 18-508 208
NF P 18-509 208
NF P 18-800 ..... 214, 217, 301, 302
prNF EN 10138-1 198
prNF EN 10138-2 198
prNF EN 10138-3 198
prNF EN 10138-4 198
XP A 35-014 193
XP A 35-025 193
XP A 35-031 193
XP A 35-037-1 199
XP A 35-037-2 199
XP A 35-037-3 199
XP A 35-045-1 198
XP A 35-045-2 198
XP A 35-045-3 198
XP P 18-340 209
XP P 18-358 303
XP P 18-359 303
XP P 18-821 ..... 160, 190, 191, 192, 287, 305, 307
XP P 18-822 ..... 160, 190, 191, 192, 287, 305, 307
XP P 18-840 ..... 26, 160, 172, 179
XP P 18-845 ..... 24, 26, 160, 170, 172, 175, 179
XP P 18-870 ..... 160, 188
XP P 18-880 160

Normes travaux
NF EN 12696 ..... 11, 79, 137, 145, 201, 203, 241, 264, 293, 328, 347
NF EN 14487-2 ..... 263, 281, 321, 338
NF EN 1504-10 ..... 8, 9, 10, 11, 17, 24, 163, 244, 245, 249, 251, 253, 254, 268, 271, 272, 300, 301, 308, 313, 317, 318, 322, 323, 325, 330, 331, 332, 333, 335
NF ENV 13670-1 323
NF P 95-1** 17, 159, 268, 271, 358
NF P 95-101 ..... 9, 17, 18, 24, 163, 244, 245, 249, 253, 254, 268, 271, 272, 300, 301, 308, 313, 317, 318, 322, 323, 325, 330, 331, 332, 333, 335, 393
NF P 95-102 ..... 9, 159, 263, 338
NF P 95-103 ..... 9, 159
NF P 95-104 ..... 9, 159, 263
XP ENV 1504-9 ..... 2, 8, 17, 21, 24, 64, 162, 175, 187

O

Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics - OPPBTP 25, 354

Ouvrages provisoires
Chargé des ouvrages provisoires - COP 28, 331
Moyens d'accès 28, 29, 67, 76, 78, 315, 331, 353

P

pH 38, 93, 41, 45, 46, 47, 48, 49, 51, 53, 60, 135, 139, 143, 144, 149, 177, 205, 289, 291, 292, 347

Processus et causes de la corrosion des armatures 46, 47, 52, 130, 143

Produits
Inhibiteurs de corrosion 46, 47, 52, 130, 143

R

Recommandations de juin 1994 du Ministère de l'Équipement sur la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction éditées par le LCPC 44, 182

Recommandations du Sétra pour la rédaction de marchés de réparation d'ouvrages d'art 79

Recommandations professionnelles de 2000
exécution des reprises de bétonnage (CEBTP, FFB et SETRA) 186, 247, 263

Recommandations T1-96 du GPEM/TMO du 6 décembre 1996
Réparation des ouvrages de stockage et de transport d'eau 75

Règlements de certification
Ciments 207
Produits spéciaux construction en béton 16, 170, 301

Responsabilités et garanties 66, 72, 74, 79, 153, 165

S

Service d'études techniques des routes et autoroutes - SETRA 20, 25, 30, 68, 79, 80, 171, 172, 174, 182, 186, 199, 247, 252, 263, 288, 361

Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de Travaux de Réparation et Renforcement des Structures - STRRES 9, 10, 11, 13, 14, 25, 30, 159, 220, 222, 246, 248, 263, 265, 269, 272, 309, 311, 317, 320, 333, 336, 360, 361

Syndicat National des Joints et Façades 25

T

Textes réglementaires
- Code du Travail 352
- Environnement 76, 156, 159, 163, 166, 244, 254, 315, 331, 356, 358
- Tenue au feu 158, 165, 175, 186

Textes réglementaires 353, 356

TABLE DES FIGURES

Figure n° 1 : les trois intervenants 2

Figure n° 2 : les normes des séries NF P 95-1** et NF EN 1504-** 17

Figure n° 3 : la préparation d'une opération de réparation par l'entrepreneur 28

Figure n° 4 : incidences des retraits sur les pièces minces et massives et dans les zones de reprises de bétonnage 35

Figure n° 5 : zones préférentielles d'attaque par l'eau de mer d'une structure 42

Figure n° 6 : diagramme de Pourbaix (ingénieur belge expert dans le domaine de la corrosion) pour un acier dans l'eau 46

Figure n° 7 : diagramme de Pourbaix en présence de chlorures 48

Figure n° 8 : le développement de la corrosion des armatures : cas du béton fissuré et cas du béton non fissuré 50

Figure n° 9 : principe de la mesure du potentiel de corrosion 68

Figure n° 10 : extrait de l'arrêt Trannoy du Conseil d'État du 2 février 1973 75

Figure n° 11 : dispositions des armatures dans des ouvrages anciens 77

Figure n° 12 : demi-coupe longitudinale et demi coupe transversale du pont de La Neuvillette 88

Figure n° 13 : principe de réalisation du pontage d'une fissure 93

Figure n° 14 : fissuration d'une poutre-caisson sous les effets des retraits 94

Figure n° 15 : cause du tassement de la pile du pont d'Œuilly 113

Figure n° 16 : principes de réparation d'un hourdis inférieur par injection de béton ou par béton projeté 116

Figure n° 17 : principe de renforcement d'une poutre par ajout de béton et d'armatures 120

Figure n° 18 : principe de renforcement d'un poteau, vis-à-vis des charges d'exploitation seules, par ajout de béton et armatures 120

Figure n° 19 : principe de renforcement d'une pile, vis-à-vis des charges permanentes et d'exploitation, avec mise en charge par vérinage 121

Figure n° 20 : principe de réalisation d'un renforcement d'une dalle et d'une poutre par béton contrecollé 122

Figure n° 21 : principes de renforcement d'une poutre à l'effort tranchant par étriers actifs extérieurs 128

Figure n° 22 : principes de renforcement de l'âme d'une poutre-caisson par des barres de précontrainte 128

Figure n° 23 : principe de renforcement à l'effort tranchant du viaduc de Saint-Isidore (autoroute A 8) 129

Figure n° 24 : principes de renforcement d'une poutre par précontrainte additionnelle longitudinale 130

Figure n° 25 : évolution de la corrosion des armatures suivant que le béton est ou non fissuré 135

Figure n° 26 : principe de réalisation d'une protection cathodique par courant imposé 145

Figure n° 27 : principes de la déchloruration et de la ré-alcalinisation par courant imposé 150

Figure n° 28 : photocopie du tableau B.1 de l'annexe B de la norme EN 1504-3 (noter la traduction inappropriée) 161

Figure n° 29 : extrait d'une fiche de données de sécurité (FDS) de la société Parexlanko 167

Figure n° 30 : principe d'une injection sous pression d'un mortier ou d'un micro-béton 231

Figure n° 31 : dispositions à respecter pour le dégagement des armatures 256

Figure n° 32 : distance minimale à respecter entre la barre et le béton lors de la préparation du support 257

Figure n° 33 : principe d'une reprise de bétonnage avec redans 264

Figure n° 34 : diagramme de Mollier pour la détermination du point de rosée 268

Figure n° 35 : principe de coffrage pour la réparation de l'about d'une dalle en encorbellement 277

Figure n° 36 : principes à appliquer pour la réparation d'une poutre par béton ou mortier projeté 279

Figure n° 37 : principe de la cheminée de bétonnage pour la réparation d'une poutre 280

Figure n° 38 : principe de réparation par injection d'un mortier ou d'un micro-béton 281

Figure n° 39 : principe de renforcement, vis-à-vis des charges permanentes et d'exploitation d'un poteau support d'un plancher-champignon 283

Figure n° 40 : joint hydro-expansif assurant l'étanchéité d'une reprise de bétonnage (crédit-photo SNAAM) 285

Figure n° 41 : principe de réalisation de l'injection de la périphérie d'une reprise de bétonnage 285

Figure n° 42 : réception par le contrôleur des produits de réparation 301

Figure n° 43 : conséquences si les principes à respecter lors du dégagement d'armatures corrodées ne sont pas respectés 326

Figure n° 44 : symboles de danger (extrait d'un document Weber et Broutin) 352

Figure n° 45 : extrait d'une fiche de données de sécurité (FDS) de la société Parexlanko 356

Figure n° 46 : guide du STRRES 2000 relatif à la rédaction des PAQ en réparation 360

TABLE DES PHOTOS

Photo n° 1 : le guide LCPC-SETRA de 1996 et le guide de l'AFGC de 2003 (crédit photo AFGC, LCPC et SETRA) 30

Photo n° 2 : différents désordres de structures en béton armé et précontraint (photomontage) 32

Photo n° 3 : bétons affectés par le gel interne (crédit photo D. Poineau) 34

Photo n° 4 : béton affecté par l'écaillage (crédit photo D. Poineau) 35

Photo n° 5 : béton après un incendie (crédit photo CETU) 37

Photo n° 6 : traces de calcite (crédit photo D. Poineau) 39

Photo n° 7 : dégradations du béton par une attaque sulfatique externe (crédit photo LCPC) 40

Photo n° 8 : dégradations du béton d'une pile dues à l'eau de mer (crédit photo Freyssinet) 42

Photo n° 9 : exemples d'alcali-réaction et d'attaque sulfatique interne (crédit photo D. Poineau et LCPC) 44

Photo n° 10 : guide du LCPC de 2003 (crédit photo LCPC) 44

Photo n° 11 : guide du LCPC de 2007 (crédit photo LCPC) 44

Photo n° 12 : manifestations visuelles de la corrosion (crédit photo D. Poineau) 45

Photo n° 13 : exemple de corrosion avec polarisation cathodique (crédit photo Freyssinet) 47

Photo n° 14 : exemple de désordres extrêmes dus à la corrosion (crédit photo D. Poineau) 50

Photo n° 15 : fissure de retraits gênés (crédit photo D. Poineau) 52

Photo n° 16 : fissure avec passage d'eau, conséquences de la corrosion localisée ainsi induite (crédit photo DDE 54) 54

Photo n° 17 : conséquences d'un choc sur le tablier d'un pont (crédit photo du CETE de Lyon) 55

Photo n° 18 : effets des efforts concentrés sous les ancrages en l'absence de vérification des contraintes dans le béton (crédit photo D. Poineau) 56

Photo n° 19 : rupture par corrosion d'une armature de précontrainte par défaut d'injection (crédit photo D. Poineau) 56

Photo n° 20 : conséquences d'un défaut de conception et d'entretien des dispositifs d'évacuation des eaux et de l'étanchéité (crédit photo D. Poineau) 57

Photo n° 21 : défaut d'enrobage, cause de la corrosion des armatures (crédit photo LRPC de Strasbourg) 59

Table des illustrations

Photo n° 22 : corrosion par dissolution d'armatures de précontrainte (crédit photo LRPC de Strasbourg) 60

Photo n° 23 : fissures de corrosion fissurante sous tension sur un fil d'un toron (crédit photo LREP) 61

Photo n° 24 : défaut de bétonnage sous le talon d'une poutre préfabriquée (crédit photo LRPC de Strasbourg) 62

Photo n° 25 : le fouettement du câble est la conséquence de la rupture par corrosion d'une armature de précontrainte extérieure (crédit photo D. Poineau) 62

Photo n° 26 : fissuration d'une poutre en béton précontraint (crédit photo LRPC d'Aix-en-Provence) 63

Photo n° 27 : filets de protection sous un pont en béton armé ancien et désaffecté (crédit photo D. Poineau) 65

Photo n° 28 : inspection détaillée du pont de la Caille (crédit photo D. Poineau) 67

Photo n° 29 : réalisation d'une mesure de potentiel (crédit photo CEBTP-SOLEN - Division Pathologie des ouvrages Ile-de-France - G. Taché) 69

Photo n° 30 : mesure de la profondeur de carbonatation (crédit photo Lerm) 72

Photo n° 31 : désordres d'un réservoir d'eau potable (crédit photo D. Poineau) 76

Photo n° 32 : adaptation du matériel de vérinage aux emplacements disponibles (crédit photo VSL France - M. Loubeyre) 78

Photo n° 33 : application d'un revêtement sur la corniche d'un pont 85

Photo n° 34 : recommandations du LCPC pour la formulation des bétons au gel (2003) (crédit photo SCETAUROUTE) 87

Photo n° 35 : état de désorganisation du béton du hourdis (crédit photo D. Poineau) 87

Photo n° 36 : le tablier sur cintre après démolition du hourdis (crédit photo D. Poineau) 88

Photo n° 37 : le tablier après reconstitution du ferraillage du hourdis et avant bétonnage (crédit photo D. Poineau) 89

Photo n° 38 vue générale du pont de la Caille en hiver (crédit photo DDE 74) 89

Photo n° 39 : état du béton d'un des bandeaux de l'arc (crédit photo DDE 74) 90

Photo n° 40 : bandeau après purge du béton désorganisé, scellement de nouvelles armatures et avant bétonnage par projection (crédit photo DDE 74) 90

Photo n° 41 : vue de l'arc après projection et avant mise en place d'une chape d'étanchéité (crédit photo D. Poineau) 91

Photo n° 42 : vue de l'arc avec sa chape d'étanchéité non adhérente (crédit photo D. Poineau) 91

Photo n° 43 : revêtement de protection après réparations locales 92

Photo n° 44 : pontage d'une fissure (crédit photo SIKA) 94

Photo n° 45 : érosion hydraulique du radier de la chute des Bois près de Chamonix Procédé Weargrit (crédit photo Wheelabrator Allevard) 97

Photo n° 46 : réparation du radier de la chute des Bois près de Chamonix Procédé Weargrit (crédit photo Wheelabrator Allevard) 97

Photo n° 47 : un des deux massif de fondation du pont de la Caille avant travaux (crédit photo DDE 74) 100

Photo n° 48 : travaux en cours sur un des deux massif de fondation du pont de la Caille (crédit photo DDE 74) 100

Photo n° 49 : attaque du béton par des eaux agressives (crédit photo Freyssinet) 102

Photo n° 50 : importance de la fissuration (crédit photo Freyssinet) 105

Photo n° 51 : ceinturage des pylônes par des bandes de tissus composite (crédit photo Freyssinet) 105

Photo n° 52 : ceinturage de la base des pylônes en cours de bétonnage par projection (crédit photo Freyssinet) 106

Photo n° 53 : détail du ceinturage (crédit photo Freyssinet) 106

Photo n° 54 : fissure multidirectionnelle localisée sur la face verticale, aux extrémités, d'un chevêtre d'un pont atteint de réaction sulfatique interne (crédit photo LCPC) 107

Photo n° 55 : étaiement des deux travées reposant sur le chevêtre (crédit photo VSL France) 107

Photo n° 56 : mise en place du ferraillage du nouveau chevêtre (crédit photo VSL France) 108

Photo n° 57 : rupture d'une des poutres en béton armé du pont d'Œuilly (crédit photo D. Poineau) 114

Photo n° 58 : désordres du hourdis inférieur dus à une poussée au vide locale (crédit photo D. Poineau) 115

Photo n° 59 : renforcement en tissus composite des abouts des poutres du pont sur la drôme (crédit photo RCA - M. Trouillet) 117

Photo n° 60 : renforcement des poutres de la passerelle du barrage de Pizançon (crédit photo Freyssinet) 119

Photo n° 61 : renforcement du hourdis supérieur du pont de Guignicourt par béton contrecollé (crédit photo D. Poineau) 123

Photo n° 62 : tablier provisoire et ferraillage de l'élargissement du pont de Bellevue (crédit photo CETE de l'Ouest - M. D. Guillot) 124

Photo n° 63 : bétonnage du dernier plot de l'élargissement du pont de Bellevue (crédit photo CETE de l'Ouest - M. D. Guillot) 125

Photo n° 64 : renforcement de poutres fléchies par plaques de composites (pultrudés) (crédit photo VSL France) 126

Table des illustrations

Photo n° 65 : renforcement de poutres en béton armé à l'effort tranchant PI A 6 à Arcueil (crédit photo VSL France – M. Loubeyre) 126

Photo n° 66 : frettage de poteaux par composites (crédit photo Freyssinet) 127

Photo n° 67 : renforcement à l'effort tranchant par étriers actifs en acier inoxydable du pont de Labéraudie (crédit-photo D. Poineau) 129

Photo n° 68 : renforcement par précontrainte additionnelle d'un ouvrage de la corniche à Marseille (crédit photo communauté urbaine de Marseille) 130

Photo n° 69 : corrosion d'une armature de béton armé revêtue d'époxy (extrait d'une revue US) 132

Photo n° 70 : guide de l'AFGC de juillet 2004 (crédit photo AFGC) 133

Photo n° 71 : corrosion par inversion de polarité après réparation (crédit photo Freyssinet) 140

Photo n° 72 : phases 1 et 2 d'une réparation par enlèvement du béton pollué 142

Photo n° 73 : phases 3, 4 et 5 d'une réparation par enlèvement du béton pollué 142

Photo n° 74 : réparation par enlèvement du béton pollué terminée 142

Photo n° 75 : armatures débarrassées de toute trace de corrosion au pont de Limay (crédit photo D. Poineau) 143

Photo n° 76 : application d'un revêtement anticorrosion sur des armatures de BA (crédit photo Weber et Broutin) 144

Photo n° 77 : protection galvanique (crédit photo Fosroc) 146

Photo n° 78 : anode en carbone (crédit photo Maxit France - Procédé Carbocath) 147

Photo n° 79 : anode extérieure sur un pieu métallique (crédit photo Grimaldi) 148

Photo n° 80 : déminéralisation et ré-alcalinisation par anode active (crédit photo Freyssinet) 149

Photo n° 81 : application d'un inhibiteur de corrosion à la surface du béton 152

Photo n° 82 : guide du LCPC sur la protection des bétons de 2002 (crédit photo CERI-SERP) 154

Photo n° 83 : le guide technique sur la réparation des bétons d'août 1996 (crédit photo LCPC-SETRA) 171

Photo n° 84 : recommandations de l'AFGC sur les BAP de janvier 2008 183

Photo n° 85 : guide de l'AFGC sur les BFUP de janvier 2002 (crédit photo AFGC) 184

Photo n° 86 : encollage avant pose de tissus en composites (crédit photo Freyssinet) 185

Photo n° 87 : réalisation d'un calage pour une reprise en sous-œuvre 191

Photo n° 88 : armatures inox coupées façonnées (crédit photo UGITECH S.A.) 194

Photo n° 89 : armatures en acier galvanisé au Grand Rocher du Zoo de Vincennes (crédit photo D. Poineau) 195

Photo n° 90 : armatures en composites pour béton armé (crédit photo Freyssinet) 196
Photo n° 91 : recommandations de l'AFGC sur l'utilisation des composites de juin 2007 197
Photo n° 92 : diverses armatures composites sous forme de plaques (crédit photo Freyssinet) 198
Photo n° 93 : précontrainte provisoire pour le remplacement de la précontrainte extérieure de l'ouvrage de val durance (crédit photo D. Poineau) 199
Photo n° 94 : opération de déchloruration 201
Photo n° 95 : exemple de fibres métalliques en fonte (crédit photo D. Poineau) 208
Photo n° 96 : boîtes de résines base et durcisseur (crédit photo Freyssinet) 209
Photo n° 97 : extrait d'une fiche technique (document SIKA top 122) 215
Photo n° 98 : préparation d'un mortier de réparation à base de liants hydrauliques 222
Photo n° 99 : humidification du substratum 224
Photo n° 100 : exécution d'un ragréage (crédit photo Fosroc) 225
Photo n° 101 : machine à projeter le béton en voie sèche (crédit photo D. Poineau) 227
Photo n° 102 : projection en cours 228
Photo n° 103 : planches matérialisant le coffrage d'une poutre (crédit photo D. Poineau) 232
Photo n° 104 : évents pour l'injection de la surface de reprise 233
Photo n° 105 : remplissage des trous avant scellement de barres 236
Photo n° 106 : scellement d'armatures de béton armé (crédit photo D. Poineau) 236
Photo n° 107 : manchon de jonction (crédit photo D. Poineau) 237
Photo n° 108 : opération de déminéralisation-ré-alcalinisation sur une poutre d'un immeuble (crédit photo Freyssinet) 240
Photo n° 109 : résultat d'un décapage par sablage (crédit photo D. Poineau) 251
Photo n° 110 : sacs d'abrasif sans silice pour sablage (crédit photo D. Poineau) 252
Photo n° 111 : résultats d'une hydrodémolition (crédit photo SETRA J.M. Lacombe) 252
Photo n° 112 : résultat d'un décapage léger à l'eau sous pression (crédit photo D. Poineau) 253
Photo n° 113 : incidences néfaste du marteau-piqueur sur le ferraillage (crédit photo Poineau) 254
Photo n° 114 : étaiement provisoire 255
Photo n° 115 : toutes les armatures corrodées doivent être dégagées 256
Photo n° 116 : entassement de barres 258
Photo n° 117 : mauvaise application d'un revêtement anticorrosion

(crédit photo D. Poineau) 259

Photo n° 118 : exemple de réparation développant une inversion de polarité 260

Photo n° 119 : exemple de soudures de barres de béton armé (crédit photo SIKA) 261

Photo n° 120 : mise en place de mortier de réparation à la truelle 276

Photo n° 121 : mise en œuvre d'un mortier autonivelant (crédit photo SIKA) 277

Photo n° 122 : barres scellées au pont de Châlons-en-Champagne (crédit photo D. Poineau) 286

Photo n° 123 : massif d'ancrage de la précontrainte additionnelle au pont de Châlons-en-Champagne (crédit photo SETRA) 288

Photo n° 124 : procédé de stabilisation de la corrosion de câbles de précontrainte par inhibiteurs nitriles (crédit photo PMD-ATEAV) 298

Photo n° 125 : essai de traction de surface (crédit photo VSL France) 315

Photo n° 126 : dégagement insuffisant des armatures 316

Photo n° 127 : exemple de travaux nécessitant un étaiement provisoire 317

Photo n° 128 : sondage au marteau 317

Photo n° 129 : contrôle d'étalement d'un BAP (crédit photo LRPC Clermont - M. Geoffray) 340

Photo n° 130 : projection dans une boîte pour essais sur éprouvettes carottées (crédit photo D. Poineau) 342

Photo n° 131 : restauration du Grand Rocher du Zoo de Vincennes (crédit photo D. Poineau) 343

Photo n° 132 : pont avant et après travaux de restauration 349

Photo n° 133 : défauts d'exécution 350

Photo n° 134 : équipements de protection individuelle (crédit photo D. Poineau) 354

Photo n° 135 : guide AFGC-cofrend de 2005 (crédit photo AFGC- COFREND-Presses ENPC) 365

LISTE DES TABLEAUX

Tableau n° 1 : liste et classification des différentes méthodes de réparation ou de renforcement traitées en tout ou partie dans le guide n°1 11

Tableau n° 2 : comparaison des sigles des produits en France et en Europe 20

Tableau n° 3 : extrait de la norme EN 1504-3 26

Tableau n° 4 : probabilité de corrosion en fonction du potentiel de corrosion 70

Tableau n° 5 : probabilité de la vitesse de corrosion en fonction de la résistivité du béton 70

Tableau n° 6 : vitesse et niveau de corrosion en fonction de l'intensité du courant de corrosion 71

Tableau n° 7 : méthodes de réparation des désordres d'origine physique 84

Tableau n° 8 : méthodes de réparation des désordres d'origine chimique 98

Tableau n° 9 : méthodes de réparation des désordres dus à des RGI 104

Tableau n° 10 : familles de réparations 109

Tableau n° 11 : méthodes de réparation des désordres d'origine mécanique 110

Tableau n° 12 : méthodes de restauration de la passivité des armatures 137

Tableau n° 13 : avantages et inconvénients des différentes méthodes de restauration de la passivité des armatures 138-139

Tableau n° 14 : durées de vie des différents systèmes anodiques 148

Tableau n° 15 : tableau récapitulatif de certaines applications prévues et des applications particulières 164

Tableau n° 16 : extrait du guide technique SETRA-LCPC de 1996 172

Tableau n° 17 : extrait du guide technique SETRA-LCPC de 1996 174

Tableau n° 18 : extrait de la norme EN 1504-3 177

Tableau n° 19 : performances exigées des différents produits (extrait de la norme EN 1504-3) 178

Tableau n° 20 : extrait de la norme P 18-840 179

Tableau n° 21 : extrait de la norme EN 1504-4 187

Tableau n° 22 : d'après la norme P 18-870 relative aux produits de collage 188

Tableau n° 24 : d'après la norme P 18-821 189

Tableau n° 25 : d'après la norme P 18-822 190

Table des illustrations

Tableau n° 26 : d'après la norme P 18-821 190

Tableau n° 27 : d'après la norme P 18-822 192

Tableau n° 28 : exigences de la norme EN 1504-7 204

Tableau n° 29 : tableau extrait d'un document de l'OFRS 205

Tableau n° 30 : techniques d'enlèvement du béton dégradé (synthèse des normes EN 1504-10 et P 95-101) 251

Tableau n° 31 : choix des techniques de préparation du support (d'après le guide technique du LCPC de 2002) 253

Tableau n° 32 : documents de référence sur les techniques de préparation du support 263

Tableau n° 33 : tableau synthétisant les exigences du P 18-802 303

Tableau n° 34 : essais d'identification rapide et contrôles spécifiques d'efficacité 304-305

Tableau n° 35 : correspondance entre les méthodes et les guides du STRRES 309

Tableau n° 36 : articles relatifs aux contrôles d'exécution concernant certaines des méthodes du présent guide 310

Tableau n° 37 : correspondance entre les méthodes et les guides du STRRES 311

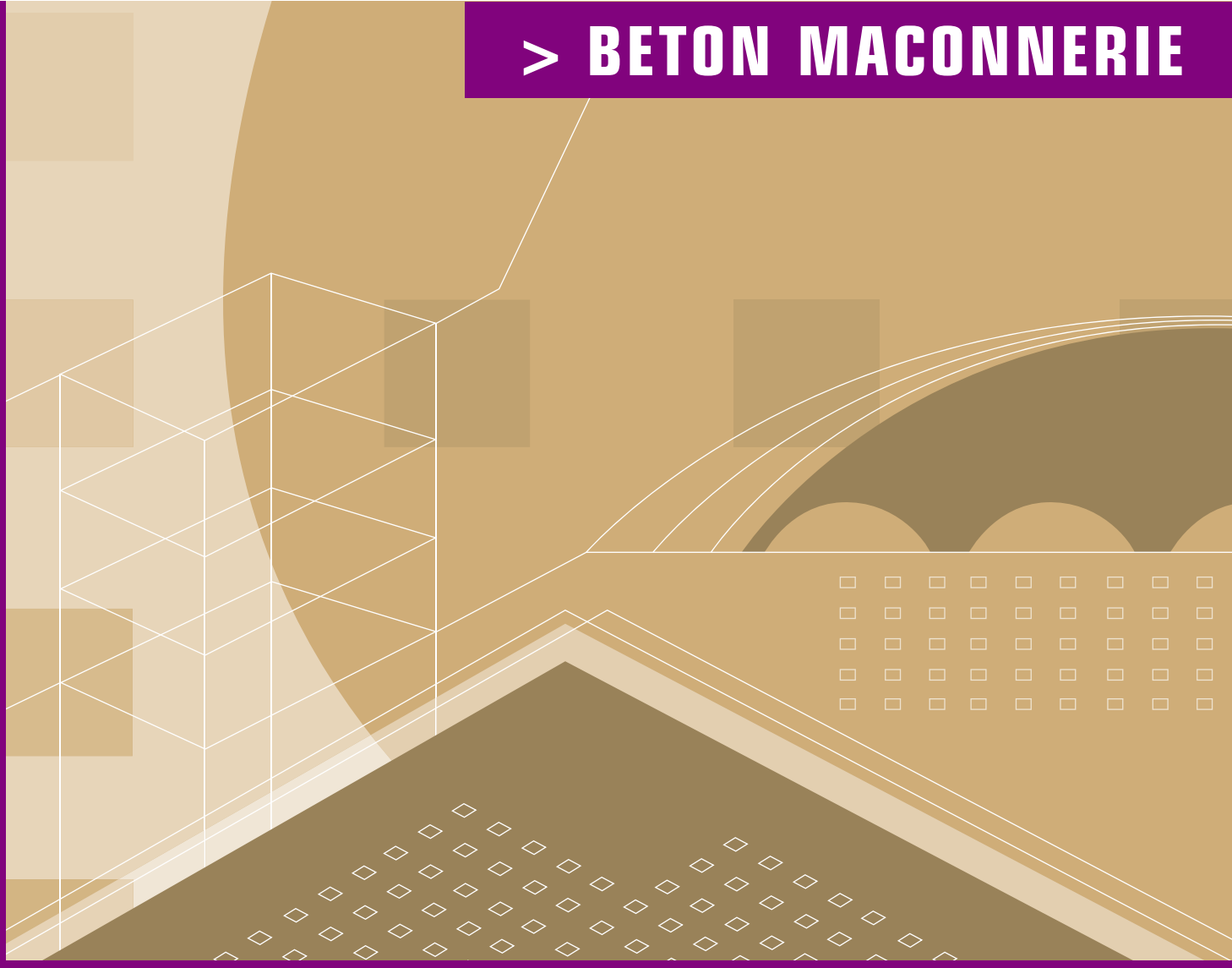
Tableau n° 38 : articles traitant des contrôles des différentes méthodes 312

Tableau n° 39 : liste des points sensibles, critiques et d'arrêt, relative à une opération de reprise d'un béton dégradé 361-362

Les extraits de normes figurant dans cette publication sont reproduits avec l'accord d'Afnor. Seul le texte original et complet de la norme tel que diffusé par Afnor a valeur normative.

I FABEM 1 I GUIDES STRRES I

> BETON MACONNERIE



ANNEXE 1

Documents de référence

STRRES
NOTRE TALENT DÉFIE LE TEMPS

UNE ÉDITION DU SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS
SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES (STRRES) / JUIN 2008

SOMMAIRE

1 LES NORMES **389**

1.1 **GÉNÉRALITÉS** **390**

1.1.1 Réglementation européenne des produits de construction **390**

1.1.2 L'Association Française de Normalisation **391**

1.1.3 Incidence de la Normalisation européenne **392**

1.2 **NORMES FRANÇAISES** **394**

1.2.1 Normes de la série P 95-10* **394**

1.2.2 Normes de la série P18-8** relatives aux produits de réparation pour béton **395**

1.2.3 Normes françaises relatives aux travaux de bâtiment (DTU) **399**

1.2.4 Textes français (fascicules de documentation, guides d'emploi et normes) relatifs aux réparations des bétons **399**

1.3 **TEXTES D'ORIGINE EUROPÉENNE (fascicules de documentation, guides d'emploi et normes) relatifs aux réparations des bétons** **403**

1.3.1 Fascicules de documentation et guides d'emploi **403**

1.3.2 Normes de produits, matériaux, fabrication et d'exécution **403**

1.3.3 Normes d'identification et d'essai **405**

1.4 **NORMES ISO DE PRODUITS, DE MATÉRIAUX ET D'ESSAIS** **410**

1.5 **MÉTHODES D'ESSAI DIVERSES** **411**

1.6 **MARQUES NF** **412**

2 FASCICULES DU CCTG **413**

3 DIRECTIVES, GUIDES, RECOMMANDATIONS ET DOCUMENTS TECHNIQUES **415**

4 DOCUMENTS DIVERS **417**

1 Les normes

Photo 1 : quelques-unes des normes nécessaires pour la rédaction de la nouvelle collection des guides du STRRES

1.1.1 RÉGLEMENTATION EUROPÉENNE DES PRODUITS DE CONSTRUCTION

Le site de la Directive Produits de Construction est consultable en tapant l'adresse : www.dpcnet.org.

> Ce site donne les textes des différents documents européens parus et la liste des documents à paraître :

- différentes directives ;
- mandats CEN ;
- mandats EOTA ;
- arrêtés ;
- avis ;
- normes harmonisées ;
- guides d'agrément technique européen ;
- projets de normes et d'agréments techniques ;
- une foire aux questions (FAQ)...

1.1.2 L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION

SITE DE L'AFNOR : pour se rendre sur le portail de l'AFNOR, taper **«wwww.afnor.fr»**, puis cliquer sur l'onglet intitulé **«plan du site»**, puis sur **«la boutique AFNOR»**, puis sur **«Normes et produits d'édition»** et, enfin, sur l'onglet **«Normes en ligne».**

> Ici, deux solutions sont possibles :

- Si on connaît l'intitulé d'une norme, il suffit de le taper dans le cadre et de cliquer sur le bouton «envoyer» (par exemple, **NF P18-800** ou **P18-800** ou **18-800** [voire **P18-8**** pour obtenir toute la série]) ;

Attention, *le texte de la norme n'est pas consultable : on trouve, au mieux, le titre, l'objet de la norme et son sommaire. De plus, si la norme a été supprimée, la recherche ne peut aboutir; il faut appeler l'AFNOR par téléphone.*

- Si on ne connaît pas l'intitulé de la norme, il faut cliquer sur **«recherche avancée».** Cinq cadres apparaissent :

  - le premier n'a pas d'intérêt puisqu'il exige la référence exacte de la norme,
  - le second permet de rentrer **des mots clefs.** Par exemple : «béton, béton armé, béton banché…» ,
  - le troisième permet de rentrer **le code ICS,** c'est-à-dire **la famille de la norme cherchée.** Par exemple : le numéro 93 concerne les normes du génie civil,
  - le quatrième permet de rentrer, soit **la date exacte** de parution de la norme recherchée, soit la période pendant laquelle elle est parue,
  - le dernier concerne **la catégorie** à laquelle appartient la norme recherchée. Par exemple : normes françaises et européennes, normes ISO…

Le moteur de recherche donne aussi accès aux règlements des différentes **marques NF** (par exemple, la marque NF relative aux produits spéciaux utilisés en réparation) ainsi qu'à la liste des produits admis à la marque et à celle de leurs fabricants.

Remarque : *L'AFNOR attribue aux normes nationales un* ***indice de classement*** *dont le numéro est le même que celui de la norme (par exemple, la norme NF T 30-800 a pour indice de classement T 30-800). Il n'en est pas de même pour les normes européennes ou internationales homologuées en normes françaises (par exemple, la norme NF EN 12504-1 a pour indice de classement P18-444).*

1.1.3 INCIDENCES DE LA NORMALISATION EUROPÉENNE

L'état d'avancement incomplet de **la normalisation européenne sur les produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton** ne permet pas encore actuellement d'y faire totalement référence. Cependant, **les normes européennes** de la série **NF EN 1504-**** se substituent progressivement, **mais en partie seulement**[1], aux normes françaises de la série **P 18-8**** en vigueur. Il en a été tenu compte et elles figurent dans les tableaux ci-après avec l'échéancier correspondant.

Normalement, le 1er janvier 2009, les produits visés par les normes NF EN 1504-2 à 5 devront être marqués CE. Ceux qui relèvent des normes NF EN 1504-6 et 7 le seront en 2010.

> NORMES DE LA SÉRIE 1504-**

Les normes européennes de la série 1504-** comprennent :

- une norme **(1504-1)** commune à tous les produits et systèmes de protection et de réparation et relative aux définitions,

- des normes **(1504-2 à 1504-7)** fixant les spécifications que doivent respecter les produits et systèmes de protection et de réparation :
  . la **1504-2** concerne les produits et systèmes de protection de surface,
  . la **1504-3** concerne les produits et systèmes de réparation structurale ou non,
  . la **1504-4** concerne les produits et systèmes de collage structural,
  . la **1504-5** concerne les produits et systèmes d'injection du béton,
  . la **1504-6** concerne les produits et systèmes d'ancrage et de scellement,
  . la **1504-7** concerne les produits et systèmes de prévention contre la corrosion des armatures,

- une norme **(1504-8)** sur la maîtrise de la qualité et l'évaluation de la conformité des produits et systèmes en usine,

- une norme **(1504-9)** sur les principes d'utilisation des produits et systèmes, fixant une démarche pour identifier l'état de la structures, les causes des désordres... et pour choisir la méthode de réparation la mieux adaptée,

- une norme **(1504-10)** sur les conditions d'application des produits et systèmes et sur le contrôle de la qualité des travaux.

Cette série de normes fait l'objet **du mandat de la Communauté Européenne M/128,** qui établit les conditions **du marquage CE** imposé par la Directive Produits de Construction (89/106/CE). Ces normes, pour la plupart, ont le statut de normes harmonisées (voir le site www.dpcnet.org/scr qui donne la liste des normes harmonisées).

Ces diverses normes de la série 1504-** renvoient en tant que de besoin à des normes d'essai EN-ISO ou EN. Ces normes d'essais remplaceront également, à terme, mais en partie seulement, les normes d'essais de la série P 18-8**. En effet, certaines normes françaises d'essais n'ont pas d'équivalent à l'échelon européen.

*[1] Par exemple, la norme **NF EN 1504-6** ne traite pas des produits de calage. Les normes **XP P 18-821** et **XP P 18-822** restent donc en partie applicables. Elles vont être amendées.*

EN CONCLUSION

- La norme **NF EN 1504-3** vise les produits et les systèmes de réparation structurale et de réparation non structurale. Elle couvre donc en totalité :

  - l'article 4 (produits et matériaux) de la norme **NF P 95-101 :** Réparation des ouvrages en béton et en maçonnerie – Reprise du béton dégradé superficiellement[2]. En effet, si la norme européenne vise surtout les produits et systèmes prêts à l'emploi, par extension, elle s'applique aux performances que doivent présenter les produits fabriqués sur le chantier,

  - la norme **XP P 18-840 :** Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydrauliques – Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci – Caractères normalisés garantis.

- La mise en application de la norme **NF EN 1504-2** est facilitée par la norme **NF EN 1504-10** qui traite de la mise en œuvre des produits et systèmes ainsi que des contrôles d'exécution. Cependant, cette norme ne traite pas de la consistance (type et nombre d'essais) des épreuves d'étude et de convenance, ni de celle (nombre d'essais) des contrôles. De plus, les exigences en matière de contrôle de réception des produits sont réduites au minimum…

- Les développements du présent **GUIDE N°1 [FABEM],** mais aussi ceux des autres **GUIDES [FABEM]** auxquels il renvoie, complètent, en tant que de besoin, les normes européennes.

NOTA IMPORTANT : *dans les différents tableaux qui suivent, les normes citées dans le* ***GUIDE N°1 [FABEM]*** *apparaissent dans les cases de* ***couleur verte.***

[2] *Cette norme ne traite pas des réparations structurales.*

> Il s'agit :

- des normes d'exécution de la série **NF P 95-10*** sur la réparation et le renforcement des structures en béton et en maçonnerie listées par le Tableau n° 1 ci-après ;
- des normes françaises homologuées ou expérimentales et des fascicules de documentation de la série **P 18-8**, relatifs aux produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique listés dans le Tableau n° 2 ci-après ;
- des normes françaises homologuées relatives aux **DTU,** traitant de la mise en œuvre et de la réparation des mortiers et bétons listées dans le Tableau n° 3 ci-après ;
- de fascicules de documentation, de guides d'emploi et de normes... listés dans le Tableau n° 4, le Tableau n° 5 et le Tableau n° 6 ci-après.

Les normes qui doivent être disponibles sur le chantier sont celles qui concernent **le marché et/ou les travaux et/ou les contrôles** imposés par **le marché.** La colonne observations indique le domaine d'emploi de chaque norme et d'autres remarques.

1.2.1 NORMES DE LA SÉRIE P 95-10*

> Sont directement visées dans le GUIDE :

- **la norme NF P 95-101** qui traite de la reprise des bétons dégradés superficiellement,
- **la norme NF P 95-102** qui traite du béton projeté (la projection étant une des techniques de mise en œuvre des mortiers et bétons lors d'une réparation ou d'un renforcement) ;
- **la norme NF P 95-103** qui traite de l'injection, du calfeutrement et du pontage des fissures ainsi que de la protection du béton ;
- **la norme NF P 95-104** qui traite de la précontrainte additionnelle.

Nota : *les normes NF P 95-101 et NF P 95-102 qui sont couvertes en très grande partie pourraient être prochainement abrogées.*

Type de norme	Norme	Date de publication	Observations
De spécifications, de travaux et de contrôles	NF P 95-101 : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Reprise du béton dégradé superficiellement – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés.	Novembre 1993	Marchés, travaux et contrôles
	NF P 95-102 : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Béton projeté – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés.	Avril 2002	
	NF P 95-103 : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - Traitement des fissures et protection du béton – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés.	Juin 1993	
	NF P 95-104 : Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - Spécifications relatives à la technique de précontrainte additionnelle.	Décembre 1992	

Tableau n° 1 : normes de la série NF P 95-1**

1.2.2 NORMES DE LA SÉRIE P18-8** RELATIVES AUX PRODUITS DE RÉPARATION POUR BÉTON

La norme homologuée **NF P 18-800** et les normes d'essais associées, les norme expérimentales **XP P 18-821, XP P 18-822, XP P 18-840, XP P 18-870, XP P 18-880** et les normes d'essai associées, ainsi que le fascicule de documentation **FD P 18-802** visés dans le **GUIDE N°1 [FBM],** concernent **les opérations réparation de surface du béton durci.**

En complément de la norme européenne NF EN 1504-10, qui est très succincte sur ce point, les principes développés pour la réception et le contrôle des produits dans la norme **NF P 18-800** et le fascicule de documentation **FD P 18-802** peuvent être utilisés. En effet, par exemple, la notion **de prélèvements conservatoires et d'essais d'identification rapide sur chantier** ne figure pas dans le texte européen.

Note : *la marque «Suppr» indique les normes qui ont une équivalence européenne et qui vont être supprimées. La marque «Rév» indique les normes à réviser. Les normes sans marque n'ont pas d'équivalence seront conservées.*

Les normes conservées seront incorporées dans le nouveau référentiel de **la Marque NF– produits spéciaux destinées aux constructions en béton hydraulique.**

Type de norme	Normes de produits et d'essais	Date de publication	Observations
De spécifications et de contrôles	**«Suppr»** NF P 18-800 : Produits spéciaux destinés aux réparations, collages, injections, calages, scellements applicables aux constructions en béton hydraulique - Définitions, classification, conditionnement, marquage, conditions de réception.	Décembre 1989	Marchés, travaux et contrôles[3]
		Décembre 1989	
De contrôles	«Suppr» FD P 18-802 : Produits spéciaux destinés aux réparations, collages, injections, calages, scellements applicables aux constructions en béton hydraulique - Contrôles sur chantier.	Octobre 1992	Contrôles[4]
D'identification	XP P 18-805 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques - Dosage en liant actif.	Novembre 1994	Contrôles
	«Suppr» NF P 18-806 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques - Analyse granulométrique.	Juillet 1989	
	NF P 18-807 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques - Perte au feu à + 450 degrés Celsius et teneur en cendres à + 950 degrés Celsius.	Novembre 1989	
	XP P 18-808 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques - Analyse minéralogique et composition potentielle selon Bogue.	Avril 1993	

[3] *La partie relative aux essais peut compléter les exigences de la norme* ***NF EN 1504-10*** *qui présente quelques insuffisances*

[4] *La partie relative aux essais peut compléter les exigences de la norme* ***NF EN 1504-10*** *qui présente quelques insuffisances*

Type de norme	Normes de produits et d'essais	Date de publication	Observations
D'identification	«Suppr» XP P 18-809 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques - Analyse par spectrophotométrie infrarouge sur produit avant mise en œuvre.	Octobre 1992	Contrôles
	NF P 18-810 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques - Détermination de la Durée Pratique d'Utilisation (DPU).	Septembre 1989 La DPU diffère du temps ouvert (NF EN 12189)	
	XP P 18-811 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques - Préparation d'un échantillon pour essai.	Octobre 1992	
	«Suppr» NF P 18-812 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques - Détermination de l'indice d'époxyde.	Juillet 1989	
	«Suppr» NF P 18-813 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques - Dosage des fonctions aminées par l'indice de basicité totale.	Septembre 1987	
Produits de calage et de scellement			
De spécifications	«Rév» XP P 18-821 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de calage et de scellement à base de liants hydrauliques – Caractères normalisés et garantis.	Septembre 1993	Marchés et contrôles
	«Rév» XP P 18-822 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de calage et de scellement à base de résines synthétiques – Caractères normalisés et garantis.	Septembre 1993	
De conception	FD P 18-823 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de scellement à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques – Recommandations pour le dimensionnement des scellements de barres d'armature dans le béton.	Juin 2004	Marchés, travaux et contrôles
De performances (1)	«Suppr» XP P 18-831 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de scellement à base de liants hydrauliques ou de résines synthétiques – Essai d'arrachement.	Avril 1993	Contrôles
	XP P 18-832 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de calage à base de liants hydrauliques – Essai d'aptitude à la mise en place.	Octobre 1992	
	XP P 18-833 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de calage à base de résines de synthèse – Essai d'aptitude à la mise en place.	Octobre 1992	
	XP P 18-834 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de calage à base de liants hydrauliques – Essai de ressuage en milieu confiné.	Octobre 1992	
	XP P 18-835 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de calage à base de résines de synthèse – Essai de fluage en compression à + 23 degrés Celsius et + 70 degrés Celsius.	Avril 1993	
	«Suppr» XP P 18-836 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de scellement à base de résines de synthèse – Essai de fluage en traction à + 23 degrés Celsius et + 50 degrés Celsius.	Juillet 1993	
	XP P 18-837 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits de calage et/ou scellement à base de résines synthétiques – Essai de tenue à l'eau de mer et/ou à l'eau à haute teneur en sulfate.	Avril 1993	

Type de norme	Normes de produits et d'essais	Date de publication	Observations
Produits de réparation de surface			
De spécifications	«Suppr» XP P 18-840 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci – Caractères normalisés et garantis.	Septembre 1993	Marchés et contrôles
De performances (1)	XP P 18-851 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci – Essai de flexion sur éprouvette évidée et reconstituée.	Novembre 1992	Contrôles
	XP P 18-852 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci – Essai d'adhérence par traction sur dalle support à surface sciée.	Avril 1993	
	«Suppr» XP P 18-853 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci – Essai d'adhérence par traction après cycles thermiques sur dalle support à surface sciée.	Avril 1993	
	«Suppr» XP P 18-854 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci – Essai de tenue aux chocs répétés sur éprouvettes à surface sciée	Avril 1993	
	XP P 18-855 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci – Essai de perméabilité aux liquides sur éprouvettes à surface sciée.	Novembre 1992	
	XP P 18-856 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci – Essai de tenue aux rayonnements ultra-violets.	Avril 1993	
	«Suppr» XP P 18-857 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci – Essai, après cycles de gel-dégel, de tenue aux chocs répétés sur éprouvettes à surface sciée.	Avril 1993	
	«Suppr» XP P 18-858 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci – Essai d'adhérence par traction sur dalle support à surface rugueuse.	Avril 1993	
	«Suppr» XP P 18-859 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci – Essai d'adhérence par traction après cycles thermiques sur dalle support à surface rugueuse.	Avril 1993	
	«Suppr» XP P 18-860 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci – Essai de tenue aux chocs répétés sur éprouvettes à surface rugueuse.	Avril 1993	
	«Suppr» XP P 18-861 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci – Essai, après cycles de gel-dégel, de tenue aux chocs répétés sur éprouvettes à surface rugueuse.	Avril 1993	

De performances (1)	«Suppr» XP P 18-862 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques destinés aux réparations de surface du béton durci – Essai de perméabilité aux liquides sur éprouvettes à surface rugueuse.	Avril 1993	Contrôles
Produits de collage			
De spécifications	«Suppr» XP P 18-870 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits ou systèmes de produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques pour collage structural entre deux éléments de béton – Caractères normalisés et garantis.	Octobre 1993	Marchés et contrôles
De performances (1)	XP P 18-871 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits pour collage structural entre deux éléments de béton – Essai de traction directe sur cylindre scié et reconstitué.	Décembre 1993	Contrôles
	«Suppr» XP P 18-872 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits pour collage structural entre deux éléments de béton – Essai de compression – Cisaillement sur prisme scié et reconstitué.	Décembre 1993	
	«Suppr» XP P 18-873 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de résines synthétiques pour collage structural entre deux éléments de béton – Essai de tenue sur surface verticale.	Décembre 1993	
	XP P 18-874 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits pour collage structural entre deux éléments de béton – Essai de détermination du temps limite d'assemblage.	Juillet 1989	
Produits d'injection			
De spécifications	«Suppr» XP P 18-880 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques pour injections dans les structures en béton – Caractères normalisés et garantis.	Juillet 1994	Marchés et contrôles
De performances (1)	«Suppr» XP P 18-891 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques pour injection dans des structures en béton - Essai d'injectabilité à la colonne de sable en milieu sec et/ou humide.	Octobre 1992	Contrôles
	«Suppr» XP P 18-892 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques pour injection dans des structures en béton - Essai de fendage d'éprouvettes cylindriques de mortier provenant de l'injection d'une colonne de sable.	Octobre 1992	
	XP P 18-893 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de résines synthétiques pour injection dans des structures en béton - Essai de fragilité au choc.	Octobre 1992	
	XP P 18-894 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques pour injection dans des structures en béton - Essai d'adhérence avec ou sans cycles thermiques.	Juillet 1993	
	XP P 18-895 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de résines synthétiques ou de liants hydrauliques pour injection dans des structures en béton - Essai de vieillissement de l'adhérence par fatigue mécanique.	Juillet 1993	
	XP P 18-896 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de résines synthétiques pour injection dans des structures en béton - Essai de retrait de polymérisation.	Avril 1993	
	XP P 18-897 : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique – Produits à base de résines synthétiques pour injection dans des structures en béton - Essai de tenue de l'adhérence sous circulation d'eau.	Novembre 1994	

Tableau n° 2 : normes de la série P 18-8* *

Nota : *(1) les essais de performance servent également à la sélection des produits.*

1.2.3 NORMES FRANÇAISES RELATIVES AUX TRAVAUX DE BÂTIMENT (DTU)

Type de norme	DTU	Normes d'exécution	Date de publication	Observations
De spécifications, de travaux et de contrôles	21	NF P 18-201 : Travaux de bâtiment – Exécution des ouvrages en béton - Cahier des clauses techniques.	Mars 2004	Marchés, travaux et contrôles
De conception, de travaux et de contrôles	42.1 Modifié en 2007	NF P 84-404 : Travaux de bâtiment - Réfection des façades en service par revêtements d'imperméabilité à base de polymères - Partie 1-1 : Cahier des clauses techniques – Partie 1-2 : critères généraux de choix des matériaux – Partie 2 : cahier des clauses spéciales - Référence commerciale des parties P1-1, P1-2 et P2 du DTU 42.1 de novembre 2007.	Novembre 2007	

Tableau n° 3 : liste des DTU

1.2.4 TEXTES FRANÇAIS (FASCICULES DE DOCUMENTATION, GUIDES D'EMPLOI ET NORMES) RELATIFS AUX RÉPARATIONS DES BÉTONS

1.2.4.1 Fascicules de documentation et guides d'emploi

Type de document	Fascicules de documentation et guides	Date de publication	Observations
De spécifications et de conception	FD P 18-011 : Classification des environnements agressifs.	Juin 1992	Marchés et travaux
De spécifications, de conception et de contrôles	GA P 18-902 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton – Recommandations pour la sélection des systèmes de protection de surface des bétons destinés aux ouvrages de génie civil.	Mai 2004	Marchés, travaux et contrôles (Cf. NF EN 1504-02)
De spécifications et de contrôles	FD P 18-503 : Surfaces et parements du béton – éléments d'identification.	Novembre 1999	Marchés, travaux et contrôles

Tableau n° 4 : fascicules de documentation et guides

1.2.4.2 Normes de produits et matériaux

Type de norme	Normes de produits et matériaux	Date de publication	Observations
	Normes liants hydrauliques		Voir les normes européennes.
De spécifications et de contrôles	NF P 15-300 à 15-319 : diverse normes relatives aux ciments.	De 1964 à 2006	Marchés, travaux et contrôles
	Normes granulats		Voir les normes européennes.
De spécifications et de contrôles	XP P 18-545 : Granulats – Éléments de définition, conformité et codification.	Février 2004	Marchés, travaux et contrôles
	Normes additions		Voir les normes européennes.
De spécifications et de contrôles	NF P 18-506 : Additions pour bétons hydrauliques – Laitier vitrifié moulu de haut-fourneau - Spécifications et critères de conformité.	Mars 1992	Marchés, travaux et contrôles
	NF P 18-508 : Additions pour bétons hydrauliques – Additions calcaires – Spécifications et critères de conformité.	Juillet 1995	
	NF P 18-509 : Additions pour bétons hydrauliques – Additions siliceuses – Spécifications et critères de conformité.	Décembre 1998	
	Normes adjuvants		Voir les normes européennes.
De spécifications et de contrôles	XP P 18-340 : Adjuvants – Adjuvants spéciaux pour bétons – Définitions, spécifications et critères de conformité.	Décembre 1998	Marchés, travaux et contrôles
	NF P 18-370 : Adjuvants – Produits de cure pour bétons et mortiers - Définitions, spécifications et critères de conformité.	Octobre 1995	
	Normes armatures de béton armé		Voir les normes européennes.
De spécifications et de contrôles	XP A35-014 : Aciers pour béton armé - Barres et couronnes lisses, à verrous ou à empreintes en acier inoxydable.	Décembre 2003	Marchés, travaux et contrôles
	NF A 35-015 : Aciers pour béton armé – Aciers soudables lisses – Barres et couronnes.	Novembre 2007	
	NF A 35-016-1 : Aciers pour béton armé – Aciers soudables à verrous – Partie 1 : barres et couronnes.	Novembre 2007	
	NF A 35-016-2 : Aciers pour béton armé – Aciers soudables à verrous – Partie 2 : treillis soudés.	Novembre 2007	
	NF A 35-017 : Aciers pour béton armé - Barres et couronnes non soudables à verrous.	Décembre 2007	
	NF A 35-019-1 : Aciers pour béton armé – Aciers soudables à empreintes - Partie 1 : Barres et couronnes.	Novembre 2007	
	NF A 35-019-2 : Aciers pour béton armé – Aciers soudables à empreintes - Partie 2 : Treillis soudés.	Novembre 2007	
	NF A 35-020-1 : Produits en acier – Dispositifs de raboutage ou d'ancrage d'armatures à haute adhérence pour le béton – Partie 1 : prescriptions relatives aux performances mécaniques (support marque NF254).	Juillet 1999	

Type de norme	Normes de produits et matériaux	Date de publication	Observations
De spécifications et de contrôles	NF A 35-020-2 : Produits en acier – Dispositifs de raboutage ou d'ancrage d'armatures à haute adhérence pour le béton – Partie 2 : méthodes d'essai.	Juillet 1999	Marchés, travaux et contrôles
	NF A 35-021 : Aciers pour béton armé - Fils soudables utilisés pour la fabrication d'armatures pour béton.	Février 1998	
	NF A 35-024 : Aciers pour béton armé - Treillis soudés constitués de fils de diamètre inférieur à 5 mm.	Décembre 2007	
	XP A 35-025 : Produits en acier – Barres et couronnes pour béton armé – Fils destinés à la fabrication d'armatures pour béton armé galvanisées à chaud.	Mars 2002	
	NF A 35-027 : Produits en acier pour béton armé – Armatures.	Janvier 2003	
	NF A 35-028 : Aciers pour béton armé – Treillis raidisseurs.	Novembre 2007	
	FD A 35-029 : Armatures pour béton armé – Assemblages soudés – Qualification d'un mode opératoire de soudage – Qualification des soudeurs.	Septembre 1999	
	NF A 35-030 : Produits sidérurgiques - Barres crénelées à haute adhérence pour poteaux en béton armé support de ligne.	Décembre 2007	
	XP A 35-031 : Armatures pour béton armé - Barres soudables à verrous de diamètre supérieur à 40 mm.	Obsolète	
	Normes précontrainte		Voir les normes européennes.
De spécifications et de contrôles	NF A 35-035 : Produits en acier – Fils lisses et torons de précontrainte à 7 fils revêtus par immersion à chaud de zinc ou d'alliage de zinc.	Février 2001	Marchés, travaux et contrôles
	XP A 35-037-1 : Produits en acier à haute résistance protégés par gaines : partie 1 : prescriptions générales.	Mai 2003	
	XP A 35-037-2 : Produits en acier à haute résistance protégés par gaines : partie 2 : prescriptions spécifiques aux torons protégés gainés coulissants (type P).	Mai 2003	
	XP A 35-037-3 : Produits en acier à haute résistance protégés par gaines : partie 3 : prescriptions spécifiques aux torons protégés gainés adhérents (type SC)	Mai 2003	
	XP A 35-045-1 : Produits en acier – Armatures de pré-contrainte – Partie 1 : prescriptions générales.	Février 2000	
	XP A 35-045-2 : Produits en acier – Armatures de précontrainte – Partie 2 : fils.	Février 2000	
	XP A 35-045-3 : Produits en acier – Armatures de précontrainte – Partie 3 : torons.	Février 2000	

Tableau n° 5 : normes françaises de produits et matériaux

1.2.4.3 Normes d'identification ou d'essai

Type de norme	Normes d'identification et d'essai	Date de publication	Observations
De contrôles	NF A 09-202 : Essais non destructifs – Principes généraux de l'examen radiologique à l'aide de rayons X et gamma des matériaux béton, béton armé.	Décembre 1999	Contrôles
	Normes coulis		
De performances (1)	XP P 18-358 : Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Coulis courants d'injection pour précontrainte – Mesure de la fluidité et de la réduction d'eau.	Juillet 1985	Contrôles
	XP P 18-359 : Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Coulis courants d'injection pour précontrainte – Mesure de l'exsudation (stabilité).	Juillet 1985	
	XP P 18-362 : Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Coulis courants d'injection pour précontrainte – Détermination des débuts et fin de prise.	Juillet 1985	
	Normes bétons		
De performances (1)	XP P 18-420 : Béton - Essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence d'une solution saline.	Juin 1995	Contrôles
	Normes peintures et revêtements		
De performances (1)	NF T 01-011 : Indicateur de pH. – liste de solutions préférentielles.	Août 1970	Contrôles
	NF T 30-121 : Peintures – Détermination de l'épaisseur du feuil sec – méthode du micromètre.	Août 1974	
	NF T 30-122 : Peintures – Détermination de l'épaisseur du feuil sec – méthode du comparateur.	Août 1974	
	NF T 30-123 : Peintures – Détermination de l'épaisseur du feuil sec – méthodes du microscope.	Août 1974	
	NF T 30-124 : Peintures – Détermination de l'épaisseur du feuil sec – méthode non destructive à flux magnétique.	Décembre 1991	
	NF T 30-125 : Peintures – Détermination de l'épaisseur du feuil frais.	Août 1974	

Tableau n° 6 : normes d'identification et d'essai

Nota : *(1) les essais de performance servent également à la sélection des produits.*

1.3.1 FASCICULES DE DOCUMENTATION ET GUIDES D'EMPLOI

Type de document	Fascicules de documentation et guides	Date de publication	Observations
De conception, de travaux et de contrôles	FD CEN/TS 14038-1 : Ré-alcalinisation électrochimique et traitement d'extraction des chlorures applicables au béton armé.	Janvier 2005	Marchés, travaux et contrôles

Tableau n° 7 : fascicules de documentation et guides d'emploi

1.3.2 NORMES DE PRODUITS, MATÉRIAUX, FABRICATION ET D'EXÉCUTION

Type de norme	Normes de produits, de matériaux, de fabrication et d'exécution	Date de publication	Observations
	Normes liants hydrauliques		
De spécifications et de contrôles	NF EN 197-1 : Ciments – Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.	Février 2001	Marchés, travaux et contrôles
	NF EN 197-4 : Ciments – Partie 4 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants de haut-fourneau à faible résistance à court terme.	Décembre 2004	
	NF EN 413-1 : Ciment à maçonner – Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.	Décembre 2004	
	NF EN 459-1 : Chaux de construction – Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.	Octobre 2002	
	NF EN 14216 : Ciments – Composition et critères de conformité des ciments à faible chaleur d'hydratation.	Décembre 2004	
	NF EN 14216 : Ciments – Composition et critères de conformité des ciments à faible chaleur d'hydratation.	Décembre 2004	
	Normes bétons		
De spécifications, de fabrication et de contrôles	NF EN 206-1 : Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité.	Avril 2004	Marchés, travaux et contrôles
	Normes adjuvants		
De spécifications et de contrôlesL	NF EN 934-2 : Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Partie 2 : définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage.	Septembre 2002 complétée en mai 2005 et avril 2006	Marchés, travaux et contrôles
	NF EN 934- 3 : Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Partie 3 : adjuvants pour mortiers à maçonner - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage.	Mai 2004	
	NF EN 934- 4 : Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Partie 4 : adjuvants pour coulis pour câbles de précontrainte - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage.	Septembre 2002 complétée en mars 2005	

Type de norme	Normes de produits, de matériaux, de fabrication et d'exécution	Date de publication	Observations
De spécifications et de contrôlesL	NF EN 934- 5 : Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Partie 5 : adjuvants pour bétons projetés - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage.	Décembre 2007	Marchés, travaux et contrôles
	NF EN 934- 6 : Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Partie 6 : échantillonnage, contrôle et évaluation de la conformité.	Septembre 2002	
	Normes additions		
De spécifications et de contrôles	NF EN 450-1 : Cendres volantes pour béton – Partie 1 : définition, spécifications et critères de conformité.	Octobre 2005 complétée en 2007	Marchés, travaux et contrôles
	NF EN 450-2 : Cendres volantes pour béton – Partie 2 : évaluation de la conformité.	Octobre 2005	
	NF EN 13263-1 : Fumée de silice pour béton Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité.	Septembre 2005	
	NF EN 13263-2 : Fumée de silice pour béton – Partie 2 : évaluation de la conformité.	Octobre 2005	
	Norme eau		
De spécifications et de contrôles	NF EN 1008 : Eau de gâchage pour bétons – spécifications d'échantillonnage, d'essai et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton.	Juillet 2003	Marchés, travaux et contrôles
	Normes granulats		
	NF EN 12620 : Granulats pour bétons.	Août 2003	
	NF EN 13055-1 : Granulats légers – Partie 1 : granulats légers pour bétons et mortiers.L	Décembre 2002	
	Norme exécution des ouvrages en béton		
De travaux et de contrôles	NF EN 13670-1 : Exécution des ouvrages en béton – Partie 1 : tronc commun et document d'application nationale.	Novembre 2002	archés, travaux et contrôles
	Norme protection cathodique		
De conception, de travaux et de contrôles	NF EN 12696 : Protection cathodique de l'acier dans le béton.	Juillet 2000	Marchés, travaux et contrôles
	Normes béton projeté		
De spécifications et de contrôles	NF EN 14487-1 : Béton projeté – Partie 2 : définition, spécification et conformité.	Mars 2006	Marchés, travaux et contrôles
De travaux et de contrôles	NF EN 14487-2 : Béton projeté – Partie 1 : exécution.	Août 2007	
	Normes fibres		
De spécifications et de contrôles	NF EN 14889-1 : Fibres pour béton – Partie 1 : fibres d'acier – Définitions, spécifications et conformité.	Novembre 2006	Marchés, travaux et contrôles
	NF EN 14889-2 : Fibres pour béton – Partie 2 : fibres de polymère – Définitions, spécifications et conformité.	Novembre 2006	

Type de norme	Normes de produits, de matériaux, de fabrication et d'exécution	Date de publication	Observations
	Normes précontrainte		
De spécifications et de contrôles	prNF EN 10138-1 : Armatures de précontrainte – Partie 1 : prescriptions générales.	Janvier 2001	Marchés, travaux et contrôles
	prNF EN 10138-2 : Armatures de précontrainte – Partie 2 : fils.	Janvier 2001	
	prNF EN 10138-3 : Armatures de précontrainte – Partie 3 : torons.	Janvier 2001	
	prNF EN 10138-4 : Armatures de précontrainte – Partie 4 : barres.	Janvier 2001	
	NF EN 523 : Gaines en feuillard d'acier pour câbles de précontrainte – terminologie, prescriptions, contrôle de qualité.	Janvier 2004	
	NF EN 12201-1 : Systèmes de canalisations en plastique pour l'alimentation en eau – Polyéthylène (PE) – Partie 1 : généralités.	Septembre 2003	
	NF EN 12201-2 : Systèmes de canalisations en plastique pour l'alimentation en eau – Polyéthylène (PE) – Partie 1 : tubes.	Septembre 2003	
	NF EN 12201-5 : Systèmes de canalisations en plastique pour l'alimentation en eau – Polyéthylène (PE) – Partie 5 : aptitude à l'emploi du système.	Septembre 2003	
	ISO 14654 : Armatures en acier pour béton armé avec revêtement époxy.	Décembre 1996	
	ISO 14655 : Toron pour la précontrainte du béton avec revêtement époxy.	Décembre 1999	
	ISO 14656 : Poudre époxy et matériau de réparation pour le revêtement des armatures en acier pour béton.	Décembre 1999	

Tableau n° 8 : documents européens et internationaux

1.3.3 NORMES D'IDENTIFICATION ET D'ESSAI

	Normes liants hydrauliques		
De performances (1)	NF EN 196-1 : Méthodes d'essai des ciments – Partie 1 : détermination des résistances mécaniques.	Avril 2006	Contrôles
	NF EN 196-2 : Méthodes d'essai des ciments – Partie 1 : analyse chimique des ciments.	Avril 2006	
	NF EN 196-3 : Méthodes d'essai des ciments – Partie 3 : détermination du temps de prise et de la stabilité.	Avril 2006	
	NF EN 196-6 : Méthodes d'essai des ciments – Partie 6 : détermination de la finesse.	Avril 2006	
	NF EN 196-7 : Méthodes d'essai des ciments – Partie 7 : méthode de prélèvement et d'échantillonnage du ciment.	Avril 2006	
	NF EN 197-2 : Ciments – Partie 2 : évaluation de la conformité.	Février 2001	
	NF EN 459-2 : Chaux de construction – Partie 2 : méthodes d'essai.	Octobre 2002	
	NF EN 459-3 : Chaux de construction – Partie 3 : évaluation de la conformité.	Septembre 2002	

Type de norme	Normes d'identification et d'essai	Date de publication	Observations
	Normes mortiers		
De performances (1)	NF EN 1015-4 : Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie – Partie 4 : détermination de la consistance des mortiers frais.	Octobre 1999	Contrôles
	NF EN 1015-6 : Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie – Partie 6 : détermination de la masse volumique apparente du mortier frais.	Octobre 1999	
	NF EN 1015-17 : Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie – Partie 17 : détermination de la teneur en chlorure soluble des mortiers frais	Février 2001	
	Normes produits de réparation		
De performances (1)	NF EN 1395-1 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Partie 1 : essai d'écoulement des mortiers thixotropes.	Décembre 2002	Contrôles
	NF EN 1395-2 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Partie 2 : essai d'écoulement des mortiers et coulis.	Décembre 2002	
	NF EN 1395-3 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Partie 3 : essai d'écoulement du béton de réparation.	Décembre 2002	
	NF EN 1395-4 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Partie 4 : application de mortier de réparation en sous-face.	Décembre 2002	
	NF EN 1542 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Mesurage de l'adhérence par traction directe.	Juillet 1999	
	PrNF EN 1544 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Mesure du fluage en traction maintenue des produits à base de résines synthétiques (PC) pour le scellement d'ancrage des barres d'armature.	Mars 2007	
	NF EN 1766 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Bétons de référence pour essais.	Mars 2000	
	NF EN 1770 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais.	Juin 1998	
	NF EN 1771 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Détermination de l'injectabilité et essai de fendage.	Janvier 2005	
	NF EN 1799 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Essais de détermination de l'aptitude à l'emploi des colles structurales à appliquer sur les surfaces en béton.	Février 1999	
	NF EN 1881 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Essai des produits de scellement d'ancrage par la méthode de l'arrachement.	Juillet 2007 Ne précise pas l'âge du produit durci au moment de l'essai	
	NF EN 12189 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Détermination du temps ouvert (produits de collage).	Août 1999 Le temps ouvert diffère de la DPU (NF P 18-810)	
	NF EN 12190 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Détermination de la résistance à la compression des mortiers de réparation.	Décembre 1998	

Type de norme	Normes d'identification et d'essai	Date de publication	Observations
	Normes analyses granulométriques		
De performances (1)	NF EN 12192-1 : Produits – Analyse granulométrique – Partie 1 : méthode d'essai applicable aux composants secs des mortiers prêts à l'emploi.	Août 2002	Contrôles
	NF EN 12192-2 : Produits – Analyse granulométrique – Partie 2 : méthode d'essai pour les charges de produits de collage structuraux à base de polymères.	Juillet 1999	
	Normes bétons frais et durcis		
De performances (1)	NF EN 12350-1 : Essai pour béton frais – Partie 1 : échantillonnage.	Décembre 1999	Contrôles
	NF EN 12350-2 : Essai pour béton frais – Partie 2 : essai d'affaissement.	Décembre 1999	
	NF EN 12350-3 : Essai pour béton frais – Partie 3 : essai Vébé.	Décembre 1999	
	NF EN 12350-4 : Essai pour béton frais – Partie 4 : degré de compacité.	Mars 2001	
	NF EN 12350-5 : Essai pour béton frais – Partie 5 : essai d'étalement à la table à chocs.	Décembre 1999	
	NF EN 12350-6 : Essai pour béton frais - Partie 6 : masse volumique.	Décembre 1999	
	NF EN 12350-7 : Essai pour béton durci – Partie 7 : teneur en air – Méthode de la compressibilité.	Mars 2001	
	Normes bétons durcis		
De performances (1)	NF EN 12390-1 : Essai pour béton durci – Partie 1 : formes, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules.	Octobre 2001	Contrôles
	NF EN 12390-2 : Essai pour béton durci – Partie 2 : confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance.	Octobre 2001	
	NF EN 12390-3 : Essai pour béton durci – Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes.	Février 2003	
	NF EN 12390-4 : Essai pour béton durci – Partie 4 : résistance en compression. Caractéristiques des machines d'essai.	Août 2000	
	NF EN 12390-5 : Essai pour béton durci – Partie 5 : résistance à la flexion sur éprouvettes.	Octobre 2001	
	NF EN 12390-6 : Essai pour béton durci – Partie 6 : résistance à la traction par fendage d'éprouvettes.	Octobre 2001	
	NF EN 12390-7 : Essai pour béton durci – Partie 7 : masse volumique du béton.	Septembre 2001	
	NF EN 12390-8 : Essai pour béton durci – Partie 8 : profondeur de pénétration d'eau sous pression.	Octobre 2001	
	NF EN 12504-1 : Essais pour béton dans les structures – Partie 1 : carottes – Prélèvement, examen et essais en compression.	Août 2000	
	NF EN 12504-2 : Essais pour béton dans les structures – Partie 2 : essais non destructifs – Détermination de l'indice de rebondissement.	Février 2003	
	NF EN 12504-3 : Essais pour béton dans les structures – Partie 3 : détermination de la force d'arrachement. Juin 2005	Juin 2005	
	NF EN 12504-4 : Essais pour béton dans les structures – Partie 4 : détermination de la vitesse de propagation du son.	Mai 2005	

Type de norme	Normes d'identification et d'essai	Date de publication	Observations
	Normes produits de réparation (suite)		
De performances (1)	NF EN 12614 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Détermination de la température de transition vitreuse des polymères.	Avril 2005	Contrôles
	NF EN 12615 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Détermination de la résistance au cisaillement.	Septembre 1999	
	NF EN 12617-1 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Partie 1 : détermination du retrait linéaire des polymères et systèmes de protection de surface (SPS).	Octobre 2003	
	NF EN 12617-2 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Partie 2 : retrait des produits d'injection pour fissures formulés avec des polymères : retrait volumétrique.	Janvier 2005	
	NF EN 12617-3 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Partie 3 : détermination du retrait linéaires au jeune âge pour les produits de collage structural.	Janvier 2003	
	NF EN 12617-4 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Partie 4 : détermination des retraits et gonflements.	Novembre 2002	
	NF EN 12618-1 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Partie 1 : capacité d'adhérence et d'allongement des produits d'injection à ductilité limitée.	Janvier 2004	
	NF EN 12618-2 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Partie 2 : détermination de l'adhérence des produits d'injection après cycles thermiques ou non – Adhérence par résistance en traction.	Février 2005	
	NF EN 12618-3 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Partie 3 : détermination de l'adhérence – Méthode par cisaillement oblique.	Avril 2005	
	NF EN 12636 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Détermination de l'adhérence béton sur béton.	Septembre 1999	
	NF EN 12637-1 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Compatibilité des produits d'injection - Partie 1 : compatibilité avec le béton.	Décembre 2004	
	NF EN 12637-3 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Compatibilité des produits d'injection - Partie 3 : effet des produits d'injection sur les élastomères. béton.	Mars 2004	
	NF EN 13036-4 : Caractéristiques des routes et aérodromes - Méthodes d'essais – Partie 4 : méthode de mesurage de l'adhérence – Méthode au pendule.	Mars 2004	
	NF EN 13057 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Détermination de l'absorption capillaire.	Décembre 2002	
	NF EN 13062 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Détermination de la thixotropie des produits de protection des armatures.	Octobre 2003	

Type de norme	Normes d'identification et d'essai	Date de publication	Observations
De performances (1)	NF EN 13294 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Temps de raidissement.	Décembre 2002	Contrôles
	NF EN 13295 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Détermination de la résistance à la carbonatation.	Octobre 2004	
	NF EN 13395-1 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Détermination de l'ouvrabilité – Partie 1 : essai d'écoulement des mortiers thixotropes.	Décembre 2002	
	NF EN 13395-2 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Détermination de l'ouvrabilité – Partie 2 : essai d'écoulement des mortiers et coulis.	Décembre 2002	
	NF EN 13395-3 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Détermination de l'ouvrabilité – Partie 3 : essai d'écoulement du béton de réparation.	Décembre 2002	
	NF EN 13395-4 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Détermination de l'ouvrabilité – Partie 4 : application de mortier de réparation en sous-face.	Décembre 2002	
	NF EN 13396 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Mesurage de la pénétration d'ions chlorure.	Septembre 2004	
	NF EN 13412 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Détermination du module d'élasticité en compression.	Décembre 2002	
	NF EN 13529 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Résistance aux fortes attaques chimiques.	Janvier 2004	
	NF EN 13584 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Détermination du fluage en compression des produits de réparation.	Mars 2004	
	NF EN 13687-1 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination de la compatibilité thermique - Partie 1 : cycles de gel-dégel avec immersion dans des sels de déverglaçage.	Décembre 2002	
	NF EN 13687-2 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination de la compatibilité thermique - Partie 2 : cycles d'averses d'orage (choc thermique).	Décembre 2002	
	NF EN 13687-3 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination de la compatibilité thermique - Partie 3 : cycles thermiques sans immersion dans des sels de déverglaçage.	Décembre 2002	
	NF EN 13687-4 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination de la compatibilité thermique - Partie 4 : cycles thermiques à sec.	Décembre 2002	
	NF EN 13687-5 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination de la compatibilité thermique - Partie 5 : résistance au choc de température.	Décembre 2002	

1.3 Textes d'origine européenne
(fascicules de documentation, guides d'emploi et normes) relatifs aux réparations des bétons

les normes

Type de norme	Normes d'identification et d'essai	Date de publication	Observations
De performances (1)	NF EN 13894-1 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai – Détermination de la fatigue sous charge dynamique – Partie 1 : pendant le durcissement.	Février 2004	Contrôles
	NF EN 13894-2 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai – Détermination de la fatigue sous charge dynamique – Partie 2 : après durcissement.	Avril 2003	
	NF EN 14117 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai – Détermination du temps d'écoulement de produits d'injection à base de ciment.	Janvier 2005	
	NF EN 14216 : Ciment – Composition, spécifications et critères de conformité des ciments à très faible chaleur d'hydratation.	Décembre 2004	
	NF EN 14629 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Mesurage du taux de chlorure d'un béton durci.	Juillet 2007	
	NF EN 14630 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Mesurage de la profondeur de carbonatation d'un béton armé par la méthode phénophtaléine.	Février 2007	
	NF EN 15183 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Essai d'évaluation de la protection anticorrosion.	Janvier 2007	
	NF EN 15184 : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais – Adhérence par cisaillement d'acier revêtu de béton (essai d'arrachement).	Novembre 2006	

Tableau n° 9 : normes d'identification et d'essai

Nota : *(1) les essais de performance servent également à la sélection des produits.*

1.4 Normes ISO de produits, de matériaux et d'essais

les normes

Type de norme	Normes de produits, de matériaux, de fabrication et d'exécution	Date de publication	Observations
	Normes armatures de béton armé		
De spécifications et de contrôle	ISO 14654 : Armatures en acier pour béton armé avec revêtement époxy.	Décembre 1999	Marchés, travaux et contrôles
	Normes précontrainte		
De spécifications et de contrôle	ISO 14655 : Toron pour la précontrainte du béton avec revêtement époxy.	Décembre 1999	Marchés, travaux et contrôles
	ISO 14656 : Poudre époxy et matériau de réparation pour le revêtement des armatures en acier pour béton.	Décembre 1999	
	Normes d'essais		
De performances (1)	NF EN ISO 527-1 : Plastiques – Détermination des propriétés en traction – Partie 1 : principes généraux.	Mars 1996	Contrôles
	NF EN ISO 604 : Plastiques – Détermination des propriétés en compression.	Février 2004	
	NF EN ISO 868 : Plastiques et ébonite – Détermination de la dureté par pénétration au moyen d'un duromètre (dureté Shore).	Mars 2003	
	NF EN ISO 2811-1 : Peintures et vernis – Détermination de la masse volumique – Partie 1 : méthode pycnométrique.	Novembre 2001	

Normes ISO de produits, de matériaux et d'essais 1.4

Type de norme	Normes de produits, de matériaux, de fabrication et d'exécution	Date de publication	Observations
De performances (1)	NF EN ISO 2811-2 : Peintures et vernis – Détermination de la masse volumique – Partie 2 : méthode par immersion d'un corps (plongeur).	Novembre 2001	Contrôles
	NF EN ISO 2811-3 : Peintures et vernis – Détermination de la masse volumique – Partie 3 : méthode par oscillation.	Novembre 2001	
	NF EN ISO 2811-4 : Peintures et vernis – Détermination de la masse volumique – Partie 4 : méthode du cylindre sous pression.	Novembre 2001	
	NF EN ISO 2812-1 : Peintures et vernis – Détermination de la résistance aux liquides – Partie 1 : immersion dans des liquides autres que l'eau.	Janvier 2007	
	NF EN ISO 2812-2 : Peintures et vernis – Détermination de la résistance aux liquides – Partie 2 : méthode par immersion dans l'eau.	Janvier 2007	
	NF EN ISO 3219 : Plastiques – Polymères/résines à l'état liquide, en émulsion ou dispersion – Détermination de la viscosité au moyen d'un viscosimètre rotatif à gradient de vitesse.	Novembre 1994	
	NF EN ISO 3274 : Spécification géométrique des produits (GPS) – État de surface : méthode du profil – Caractéristiques nominales des appareils de contact (palpeur).	Décembre 1996	
	NF EN ISO 4288 : Spécification géométrique de produits (GPS) – État de surface : méthode du profil – Règles de procédures pour l'évaluation de l'état de surface.	Mars 1998	
	ISO 4677-1 : Atmosphère de conditionnement et d'essai - Détermination de l'humidité relative – Partie 1 : méthode utilisant un psychromètre à aspiration.	Octobre 1985	
	ISO 4677-2 : Atmosphère de conditionnement et d'essai - Détermination de l'humidité relative – Partie 2 : méthode utilisant un psychromètre fronde.	Octobre 1985	
	NF EN ISO 8501-1 : préparation des subjectiles en acier avant application de peinture et produits assimilés – Partie 1 : degrés de rouille et degrés de préparation des subjectiles d'acier non recouverts et des subjectiles d'acier après décapage sur toute la surface des revêtements précédents.	Septembre 2007	
	NF EN ISO 9514 : Peintures et vernis – Détermination du délai maximal d'utilisation après mélange des systèmes de revêtements multicomposants – Préparation et conditionnement des échantillons et lignes directrices pour les essais (durée de vie en pot).	Octobre 2005	
	ISO 11357-3 : Plastiques – Analyse calorimétrique différentielle (DSC) – Partie 3 : détermination de la température et de l'enthalpie de fusion et de cristallisation.	Mars 1999	

Tableau n° 10 : normes ISO

Nota : *(1) les essais de performance servent également à la sélection des produits.*

Méthodes d'essai diverses 1.5

Type de document	Recommandations	Date de publication	Observations
De contrôles	ASTM (C876-91) : Mesure du potentiel d'électrode.	1991	Contrôles
	RILEM (TC 154-EMC) : Mesure du potentiel d'électrode.	Novembre 2004	
	LCPC n°62 : présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie.	Décembre 2005	

Tableau n° 11 : recommandations

les normes

1.6.1 MARQUE NF– PRODUITS SPÉCIAUX DESTINÉES AUX CONSTRUCTIONS EN BÉTON HYDRAULIQUE

> La Marque NF recouvre exactement l'ensemble des produits relevant des normes de la série P 18-8 et en particulier les produits de réparation du béton. Elle garantit :**

- la conformité du produit certifié aux exigences de la norme de spécifications (les caractères normalisés garantis) à laquelle elle se réfère ;
- l'existence, dans la chaîne de production et de distribution, d'une organisation de la qualité reconnue.

Pour de plus amples détails, il faut se référer **au règlement de la marque référencé NF 030.** Le site de **l'AFNOR** donne la liste des produits de réparation admis à la marque. Ce règlement est en cours de révision à cause des normes européennes **de la série NF EN 504-**.**

> Rappels :

- les caractères normalisés peuvent comporter plusieurs niveaux ou classes de performance… Les valeurs correspondantes figurent obligatoirement dans la notice technique du produit et peuvent figurer sur l'étiquette de marquage ;
- **la marque NF** peut se superposer à **un marquage CE** si le produit satisfait à des exigences supplémentaires ou à une organisation de la qualité plus élevée que celle fixée par la norme européenne.

Remarque : *à ce jour,* ***la marque NF*** *ne traite pas des produits et systèmes pour la protection des bétons.*

1.6.2 MARQUE NF-LIANTS HYDRAULIQUES – CIMENTS

Se reporter au référentiel **NF 002.** Le site de **l'AFNOR** donne la liste des ciments admis à la marque.

1.6.3 MARQUE NF-GRANULATS

Se reporter au référentiel **NF 040.** Le site de **l'AFNOR** donne la liste des granulats admis à la marque.

1.6.4 MARQUE NF-ARMATURES

Se reporter au référentiel **NF 139** pour les aciers pour béton armé et au référentiel **NF 254** pour les armatures (armatures façonnées prêtes à l'emploi). La marque est gérée par **l'AFCAB.** Il existe également une **Marque-AFCAB** pour les dispositifs de raboutage ou d'ancrage d'armatures.

1.6.5 MARQUE NF-CONDUITS EN PEHD

Se reporter au référentiel **NF 114** pour les tubes en polyéthylène du **groupe 1** (tubes pour réseaux de distribution d'eau potable) et du **groupe 4** (tubes pour applications industrielles et eau non potable).

2

Fascicules du CCTG

Fascicules	Observations
Fascicule 65 A : Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou en béton précontraint par post-tension.	Marchés, travaux et contrôles (ce texte est en cours de refonte)
Additif au fascicule 65 A : Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou en béton précontraint par post-tension	

Tableau n° 12 : fascicules du CCTG

3

Directives, guides, recommandations et documents techniques

Directives, guides, recommandations et documents techniques	Date de publication	Observations
Directive 75 sur le jugement des offres éditée par le SETRA.	Année 1975	
Guide technique LCPC : Défauts d'aspect des parements en béton.	1er trimestre 1991	(Cf. FD P 18-503)
Guide SETRA, SNCF, TP de France et SNBATI : Mise en œuvre des Plans d'Assurance de la Qualité – Exécution des ouvrages en béton armé et en béton précontraint	Décembre 1991	
Recommandations du Sétra de 1993 : Marchés pour la réparation et la modification d'ouvrages d'art – Préparation et rédaction.	Février 1993	
Recommandations 1994 du MEL pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction.	Année 1994	
Cahier n°310 de l'AFGC : durabilité des bétons soumis à l'action des chlorures.	Décembre 1994	
Guide technique LCPC-SETRA : Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton.	Août 1996	
Manuel du LCPC : Manuel d'identification des réactions de dégradation interne du béton dans les ouvrages d'art.	Février 1999	
Recommandations pour l'exécution des reprises de bétonnage éditées par le CEBTP, la FFB et le SETRA	Année 2000	
Guide de rédaction d'un PAQ - Plan d'Assurance Qualité – STRRES.	Septembre 2000	
Recommandations provisoires 2002 de l'AFGC : bétons fibrés ultra-hautes performances.	Janvier 2002	
Guide technique LCPC : Protection des bétons par application de produits à la surface du parement.	Décembre 2002	
Guide méthodologique LCPC : Aide à la gestion des ouvrages atteint de réactions de gonflement interne.	Novembre 2003	
Guide de l'AFGC : Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion.	Novembre 2003	
Recommandations 2003 du LCPC pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel.	Décembre 2003	
Collection technique Cimbéton : n° T. 81 béton armé d'inox – Le choix de la durée.	Avril 2004	
Guide de l'AFGC : Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages.	Juillet 2004	
Collection technique Cimbéton : n° T. 48 bétons et ouvrages d'art - Durabilité du béton.	Novembre 2004	
Recommandations provisoires 2007 de l'AFGC pour la réparation et le renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites.	Juin 2007	
Recommandations 2007 du LCPC pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne.	Août 2007	
Fascicules ASQUAPRO (Association pour la Qualité de Projection des mortiers et bétons) relatifs aux mortiers et bétons projetés (formulation, dimensionnement, mise en œuvre, contrôle et hygiène et sécurité).	Année 2007	
Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants de l'AFGC.	Janvier 2008	
Guide de l'AFGC : maîtrise de la durabilité de la précontrainte.	(à paraître)	
Document de l'Office fédéral des routes suisse : utilisation d'aciers d'armatures inoxydables.	Septembre 2001	

Tableau n° 13 : Directives, guides, recommandations et documents techniques

4

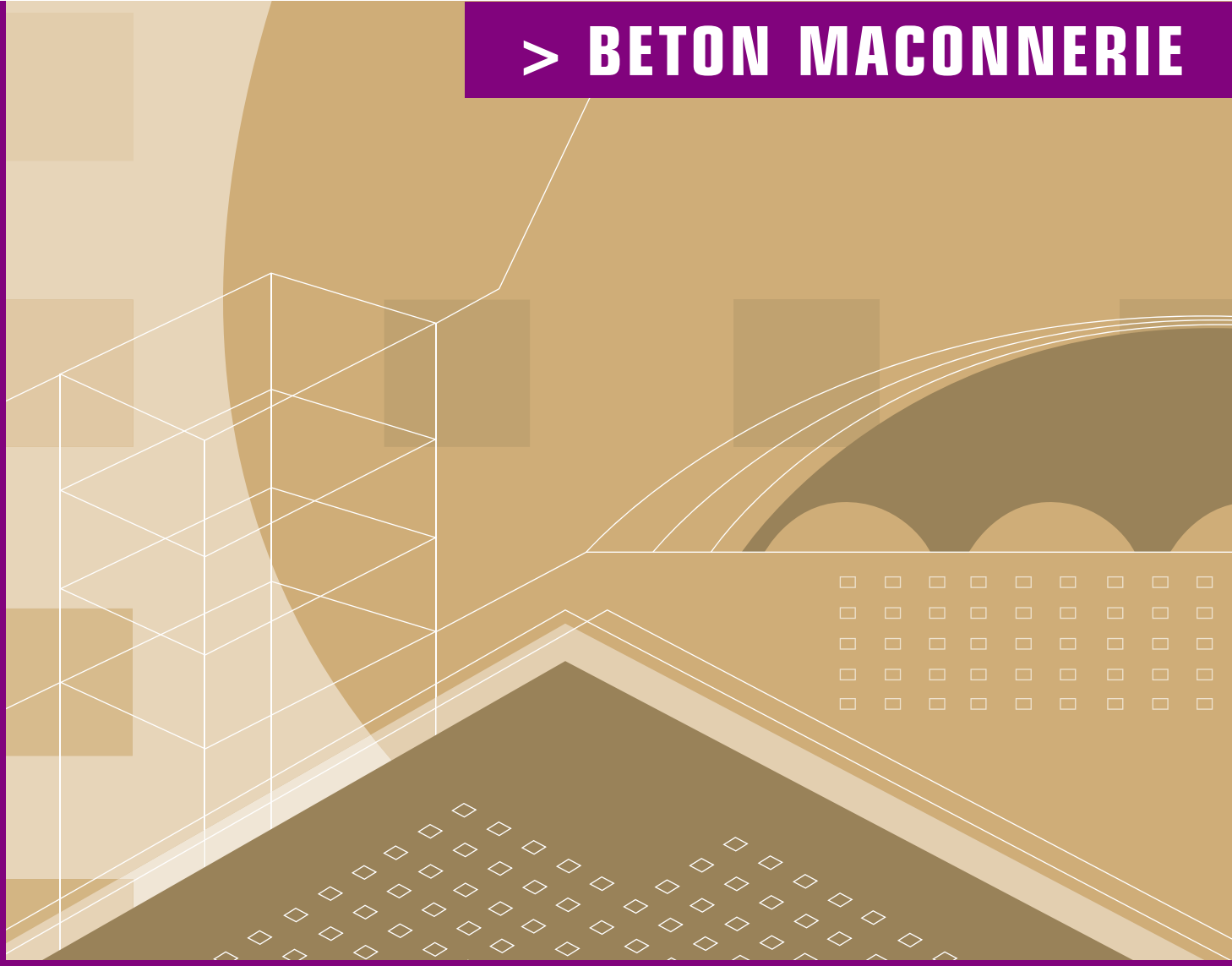
Documents divers

Documents divers	Observations
Assurance Construction : Loi 78-12 du 4 janvier 1978 modifiée (articles 1792, 1792-1, 1792-2, 1792-3, 1792-4, 1792-5, 1792-6 et 2270 du Code Civil).	JO du 5 janvier 1978
Directive Produits de Construction 89/106/CEE du 21 décembre 1988 modifiée par la Directive 93/68/CEE du 22 juillet 1993.	www.dpcnet.org (Réglementation Européenne des Produits de Construction)
Recommandation T1-96 du GPEM/TO relative aux études pour la construction et la réparation des ouvrages de stockage et de transport d'eau, qui complète le fascicule 74 du CCTG.	6 décembre 1996
Décret 2002-640 du 18 avril 2002 : classification des déchets.	J O du 20 avril 2002
Arrêté du 21 novembre 2002 relatif à la réaction au feu des produits de construction et d'aménagement.	J O du 31 décembre 2002
Arrêté du 22 mars 2004 relatif à la résistance au feu des produits, éléments de construction et d'ouvrages.	J O du 1er avril 2004
Arrêtés ministériels du 20 avril 1994, modifié par les arrêtés du 7 janvier 1997 et du 4 août 2005 (transposition de la directive 2004/73/CE du 29 avril 2004. Ces arrêtés sont relatifs à la déclaration, la classification, l'emballage et l'étiquetage des substances dangereuses.	J O n°107 du 8 mai 1994 et J O n°186 du 11 août 2005 (J O C E n°42 du 30 avril 2004 pour la directive)

Tableau n° 14 : documents divers

I FABEM 1 I GUIDES STRRES I

> BETON MACONNERIE



ANNEXE 2

Historique du béton armé

STRRES
NOTRE TALENT DÉFIE LE TEMPS

UNE ÉDITION DU SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS
SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES (STRRES) / JUIN 2008

SOMMAIRE

1 GÉNÉRALITÉS **421**

2 ÉVOLUTION DES CARACTÉRISTIQUES DU BÉTON, DES ARMATURES ET DES DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES **425**

2.1 DES ORIGINES AUX ANNÉES 50 À 60 ..... **426**

2.2 DEPUIS LES ANNÉES 50 À 60 ..... **428**

2.2.1 Le béton **428**

2.2.2 Les armatures en acier pour béton armé **429**

2.2.3 Les dispositions constructives **434**

2.3 ÉVOLUTION DES RÈGLES DE CALCUL DU BÉTON ARMÉ **438**

2.3.1 Période des débuts du béton armé aux années 1900 ..... **438**

2.3.2 Période des années 1900 aux années 60 ..... **439**

2.3.3 Période des années 60 aux années 80 ..... **439**

3 CONCLUSION **441**

1 Généralités

Il y a lieu de rappeler **«la barque en ciment armé»** de Lambot Joseph Louis de 1848 exposée à l'exposition universelle de 1855, la première passerelle en ciment armé de Monier Joseph réalisée au château de Chazelet dans l'Indre en 1875 et la construction des premiers ponts en béton armé à la fin du 19e siècle, tels les ponts de Châtellerault, œuvre de Hennebique, et de la rue Valette à Perpignan, œuvre de Simon Boussiron.

Photo n° 1 : barque de Lambot (crédit photo D. Poineau)

Photo n° 2 : passerelle de Chazelet de Monier 1875 (crédit photo Doct. Sid French)

Photo n° 3 : pont de la rue Valette à Perpignan (1899)

(Extrait de Ponts de France éditions ENPC)

Progressivement, des progrès ont été réalisés dans la composition du béton frais (Fréret 1906, Faury 1936), dans sa fabrication (bétonnières à partir 1920), dans sa mise en œuvre (début de la vibration 1920), ainsi que dans la conception et les dispositions constructives des ouvrages.

> Cependant, il faut remarquer que l'évolution de la réglementation a été plus lente. Pour s'en convaincre, il suffit :

- **de comparer entre elles les règles calcul de 1906 et de 1934** et ensuite à celles **de 1964[1].** Seules, ces dernières marquent la première grande évolution, avec la prise en compte du comportement à rupture du béton armé, tout en conservant des formules de calcul aux contraintes admissibles,
- de savoir que le cahier des charges de 1913, ancêtre du CCTG, n'a été modifié qu'en 1958 !

[1] *Principes repris des règles dites BA 60*

2

Evolution des caractéristiques du béton, des armatures et des dispositions constructives

2.1 Des origines aux années 50 à 60
2.2 Depuis les années 50 à 60
2.3 Evolution des règles de calcul du béton armé

Périodes	Valeur de la résistance	Type d'essai	Notations	Résistances de référence en fonction du dosage en ciment exprimé en kg/m³		
				300	350	400
1906	Moyenne	Cubes 20x20	R_{90} ou N_{90} R_{28}	160 kg/cm² 107 kg/cm²	180 kg/cm² 120 kg/cm²	200 kg/cm² 133 kg/cm²
1920	Moyenne	Cubes 20x20	R_{90} ou N_{90}	160 kg/cm²	180 kg/cm²	200 kg/cm²
1934	Moyenne	Cubes 20x20	R_{90}	215 kg/cm²	235 kg/cm²	250 kg/cm²
1945	Moyenne sur 6 éprouvettes	Prismes à base carrée b x b et de 4b de longueur ou cubes de 10 à 20 cm en fonction grosseur du granulat	n_{90}	230 kg/cm²	255 kg/cm²	285 kg/cm²
1960	Nominale	Cylindres 16x32, plus de 12 essais	$\sigma'28$	230 bars	270 bars	300 bars
1980	Caractéristique	Cylindres 16x32, le nombre d'échantillons est variable	f_{ck}	25 MPa	30 MPa	35 MPa

Tableau n° 1 : évolution des caractéristiques du béton

> Jusqu'aux années 1950 à 60 :

- la résistance du béton a été mesurée sur cube 20x20 à 90 jours d'âge (en 1906, fc90 = 180 kg/cm² pour un dosage de 350 kg/m³ de ciment et, en 1934, fc90 = 235 kg/cm² pour le même dosage). Ces mesures étaient en principe effectuées avec interposition de plaques de carton ;
- de même, seuls les ronds lisses de limite élastique de l'ordre de 24 kgf/mm² ont été utilisés. A noter cependant qu'à peu près tous les diamètres, de 2 à 50 mm (ϕ = 2, 3, 11, 13, 17…) ont été employés jusqu'en 1940, qui marque le début de la normalisation des armatures de béton armé ;
- cependant, quelques particularités sont à signaler :
  - les dispositions constructives des pièces en béton armé étaient propres aux différents constructeurs, Monier, Boussiron, Hennebique… Par exemple, Hennebique utilisait des étriers en fer plat dans ses constructions (25 mm x 3 mm…),
  - après la seconde guerre mondiale, ont été utilisés des aciers de récupération de forme diverses (la méfiance s'impose lors de l'expertise des ouvrages de cette époque).

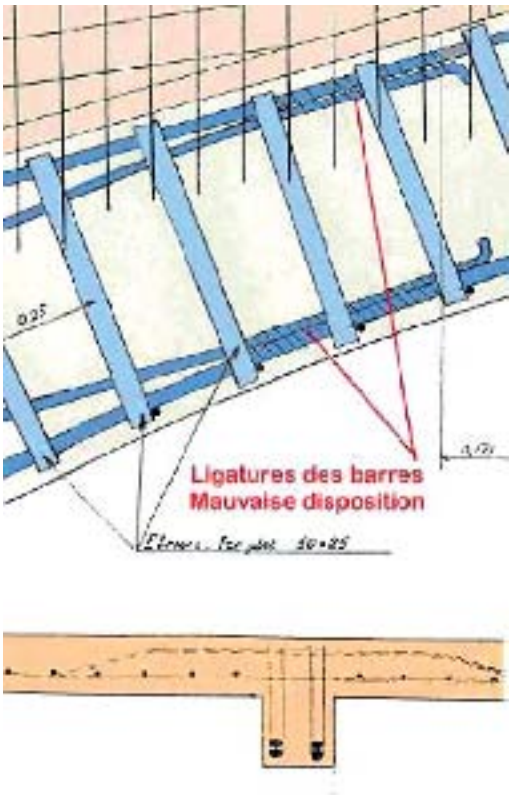


Figure n° 1 : ferraillage Hennebique d'après les plans d'une passerelle à Auxerre

Les règles de 1964 ont introduit la mesure de la résistance du béton sur cylindre à 28 jours et ont remplacé le kgf/cm² par le bar (1daN/cm²). Elles ont introduit également la résistance nominale, qui a été elle-même remplacée en 1980 par la résistance caractéristique lorsque le **BAEL 80/83** a vu le jour.

Ce même BAEL 80/83 a également introduit **la notion des états limites** (il est à noter que ces notions sont nettement plus anciennes ; en effet, elles apparaissent officiellement en 1971 avec les Directives Communes au Calcul des Constructions (DC 71) et en 1973 avec l'Instruction Provisoire n° 2 relative au calcul du béton précontraint (IP2).

2.2.1 LE BÉTON

> Pour passer de la résistance du béton mesurée sur cube à la résistance mesurée sur cylindre, l'article de J.R. Robinson des Annales des Ponts et Chaussées de juillet et août 1965 indique la fourchette suivante :

$$\frac{f_{c,cylindre}}{f_{c,cube}} = 0,83 \text{ à } 0,9$$

> La Rilem et le CEB (Comité européen du Béton devenu en 1998 la FIB) donnent les fourchettes suivantes :

Conditions des essais	Cubes non surfacés sans introduction de plaques de carton	Cubes surfacés avec introduction de plaques de carton	Organismes
$\frac{f_{\dots}}{f_{\dots}}$	0,7	0,9	Rilem
	0,75	0,9	CEB

> Pour passer de la résistance à 90 jours à la résistance à 28 jours, Il faut tenir compte de l'évolution de la résistance du béton entre 28 et 90 jours :

$f_{c,90} = 1,2 f_{c,28}$ pour les bétons à base de ciments courants,

$f_{c,90} = 1,10 \text{ à } 1,15 f_{c,28}$ pour les bétons à base de ciments à haute résistance initiale.

Relations entre les résistances moyenne, nominale et caractéristique (article de J.R. Robinson susvisé, instruction provisoire de calcul du BP de 1973 (dite IP2) et règles BAEL 83; voir également l'ouvrage «Maintenance et Réparation des Ponts» aux presses de l'ENPC page 194) :

$$f_{cn} = f_{cm} - 0,8 s_n$$

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,64 s_n$$

Dans ces expressions, fci est le résultat de l'écrasement d'une éprouvette, fcm la résistance moyenne des n essais, sn l'écart quadratique moyen, fcn la résistance nominale et fck la résistance caractéristique.

$$s_n = \sqrt{\frac{1}{n}\sum (f_{ci} - f_{cm})^2}$$

> Il est possible d'en déduire :

$$f_{ck} = 0{,}85 \text{ à } 0{,}9 f_{cm}$$

$$f_{ck} = 0{,}7 \text{ à } 0{,}85 f_{cm}$$

> Détermination de la résistance d'un béton en place :

Dans un premier temps, **des carottages in situ** vont permettre d'obtenir des carottes (respectant un élancement de 2) qui sont tout d'abord soumises à une auscultation dynamique pour mesurer la vitesse du son dans le béton, puis qui sont écrasées pour déterminer la résistance du béton. On obtient ainsi des relations entre la vitesse du son et la résistance du béton.

Dans un second temps, **une auscultation dynamique** va permettre de déterminer des zones où la vitesse du son est constante, donc des zones où le béton présente des caractéristiques mécaniques identiques.

Comme, par ailleurs, les relations entre la vitesse du son et la résistance du béton ont été mesurées, il est possible de fixer la résistance du béton des différentes parties de la structure.

Bien entendu, des ajustements sont à effectuer, car le diamètre des carottes est inférieur à celui des éprouvettes normalisées (dites 16x32, en fait le diamètre est de 15,96 cm). La formule suivante permet de passer de la résistance mesurée sur une éprouvette de diamètre ϕ et de hauteur h (ϕ et h sont exprimés en centimètres) à la résistance d'une éprouvette 16x32 (Article de Petersons de la revue Rilem 1971, Vol 7 n°24) :

$$\frac{fc,\frac{\phi}{h}}{fc,\frac{16}{32}} = 0{,}64 + \frac{1}{\frac{h}{\phi} + \frac{\phi}{20}}$$

2.2.2 LES ARMATURES EN ACIER POUR BÉTON ARMÉ

Bien que des barres torsadées en acier doux, inventées par Ransome, aient été utilisées aux U.S.A. dès 1880, les véritables aciers à haute adhérence n'ont commencé à être utilisés en France que vers les années 50 (1951 aciers Tor).

Entre 1958 et 1978, il y a lieu d'être attentif lors du recalcul d'un ouvrage, car les valeurs des limites élastiques dépendent du diamètre des barres :

- aciers HA : $\phi \leq 20$ fe = 42 kgf/mm² et $\phi \geq 25$ fe = 40 kgf/mm² ;
- aciers Tentor : fe = 45 kgf/mm² ;
- aciers Breteuil DN : $\phi \leq 16$ fe = 42 kgf/mm² et ϕ = 20 et 25 fe = 39 kgf/mm².

Remarque : *se reporter à l'ouvrage «Maintenance et Réparation des Ponts» aux presses de l'ENPC, page 199, qui donne des précisions sur les conditions de réception des armatures de béton armé.*

Le tableau ci-après résume l'évolution des aciers pour béton armé depuis les années 1900 :

Périodes	Références	Dénomination	Limite d'élasticité fe	Limite de rupture fr	Allongement À rupture A %	Coefficient De fissuration η	Coefficient de scellement ψ	Observations
De 1900 à 1958 environ	Article 30 du cahier des charges générales de 1913 modifié à diverses reprises	Ronds lisses Ac 42	~24 kgf/mm²	42 à 50 kgf/mm²	25	/	/	Généralement soudable, pliable et dépliable mais à contrôler
		Ac 54	36 kgf/mm²	54 à 64 kgf/mm²	18	/	/	Ces aciers ont pu être utilisés dans des pièces fortement comprimées
De 1958 à 1965	**Aciers doux**	Ronds lisses Adx	24 kgf/mm² si ϕ < = 25mm 21 à 22 kgf/mm² si ϕ 25 mm	33 à 50 kgf/mm²	/	1	(*)	Soudables, rarement utilisés dans les ponts
		Ac 42	24 kg/mm²	42 à 50 kgf/mm²	25	1	(*)	Aciers soudables normalement utilisés pour les ponts
	Aciers Durs	Aciers durs Ac 55	32 kg/mm²	55 à 65 kgf/mm²	>16	1	(*)	Ces ronds lisses en acier mi-dur et dur ont pu être utilisés dans des pièces fortement comprimées
		Ac 65	36 kgf/mm²	65 à 85 kgf/mm²	12	1	(*)	
		Ac 75	40 kgf/mm²	>75 kgf/mm²	6	1	(*)	
	Cahier des charges du 8 avril 1958.	Armatures HA en acier doux écroui Aciers Tentor (TT) soudable avec précautions	50 kgf/mm²	58 kgf/mm²	21	1,6	(*)	(*) d'après le CCBA 68
	Voir les fiches d'homologation des aciers à haute adhérence des règles BA 60 éditées par la documentation technique du bâtiment et des travaux publics 9 rue Lapérouse 75 016 Paris)	Acier Tor (T) soudable avec précautions	42 kgf/mm² si ϕ < = 20 40 kgf/mm² si ϕ > 25 mm	48,5 kgf/mm²	14	1,6	(*)	
		Acier Caron (C) soudable avec précautions	42 kgf/mm² si ϕ < = 20 40 kgf/mm² si ϕ > 25 mm	50 kgf/mm²	14	1,6	(*)	

Périodes	Références	Dénomination	Limite d'élasticité fe	Limite de rupture fr	Allongement À rupture A %	Coefficient De fissuration η	Coefficient de scellement ψ	Observations
De 1958 à 1965	Note technique C 12 n°1 du SCET du 22/02/1964 sur les conditions d'utilisation des armatures HA non visés par les fiches BA 60 ci-après :	Armatures HA en acier naturellement dur Acier crénelé	40 kgf/mm²	42 à 50 kgf/mm²				Normalement non soudables (teneur en C trop élevée). Ne pas déplier et pliage délicat à basse température. Acier fabriqué jusqu'à 1959
	Fiches BA 60 N°1 du 4/1/61 N°2 du 4/1/61	Acier Nersid (N) non soudable	42 kgf/mm² si ϕ < = 16 mm 40 kgf/mm² si ϕ > = 20 mm	50 kgf/mm² 48 kgf/mm²	12	1,6	(*)	
	N°2bis du 2/2/65 N°3 du 4/1/61 N°3bis du 9/7/63	Acier Créloi (SE) non soudable	45 kgf/mm² si ϕ = 8 mm 42 kgf/mm² si ϕ = 10 et 12 mm 40 kgf/mm² si ϕ de 14 à 25 mm	55 kgf/mm² 50 kgf/mm²	12		(*)	
	N°4 du 31/1/61 N°5 du 6/10/61 N°6 du 10/10/61	Acier Breteuil (BR) non soudable	42 kgf/mm² si ϕ < = 16 mm 39 kgf/mm² si ϕ = 20 à 25 mm	48 kgf/mm² 58 kgf/mm²	12	1,6	(*)	
	N° 7 du ? N°8 du 13/2/63 N°9 du 24/4/63	Fil Ardox 5400 (AX) non soudable	54 kgf/mm²	56 kgf/mm²	12	1,6	(*)	
		Acier Hi-Bond-A (HBA) soudable ou non soudable	42 kgf/mm² si ϕ < = 20 mm 40 kgf/mm² si ϕ > = 25 mm	63 kgf/mm² 58 kgf/mm²	20	1,6	(*)	Il existait deux sortes de barres, les unes en acier dur non soudable et les autres en acier soudable
De 1966 à 1978	**Aciers doux** Normes NF A35-015 et 35-016 du 30/12/66	Fe E 22 (ex Adx)	22 kgf/mm²	34 à 50 kgf/mm²	22	1	1	
	Titre 1er du fascicule 4 du CPC – Décret 67856 du 11/9/67 et circulaire n°71 du 26/10/66 Circulaire n°12 du 8 février 1968	Ronds lisses Fe E 18	Environ 18 kgf/mm² valeur non garantie	33 kgf/mm²	18	/	/	Nuance dont l'utilisation était interdite pour les ponts
	Fascicule 65 du CPC annexé à la circulaire du 13/8/69	Fe E 24 (ex Ac 42)	24 kgf/mm²	42 à 50 kgf/mm²	25	1	1	

Périodes	Références	Dénomination	Limite d'élasticité fe	Limite de rupture fr	Allongement À rupture A %	Coefficient De fissuration η	Coefficient de scellement ψ	Observations
De 1966 à 1978	Circulaire 76-64 du 3 mai 1976 relative à l'agrément et au contrôle des armatures à haute adhérence en acier pour béton armé	Fe E 34	34 kgf/mm²	60 à 72 kgf/mm²	16	1	1	
	Aciers HA	Armatures HA Fe E 40 A	42 kgf/mm² si ϕ < = 20 mm 40 kgf/mm² si ϕ > 20 mm	48,5 kgf/mm²	14	1,6	1,5	Diamètre < 40
		Fe E 40 B (acier de relaminage)	42 kgf/mm² si ϕ < = 20 mm 40 kgf/mm² si ϕ > 20 mm	48,5 kgf/mm²	12	1,6	1,5	Mandrins de pliage > ceux des Fe E 40 A
		Armatures HA nouvelles : Fe E 45	45 kgf/mm²	52 kgf/mm²	12	1,6	1,5	
		Armatures HA nouvelles : Fe E 50	50 kgf/mm²	57,5 kgf/mm²	10	1,6	1,5	
De 1978 à 1983	**Aciers doux** Nouvelle normes NF A 35-015 du 15/6/78 Nouvelles normes NF A 35-016 du 15/6/78 et NF A 35-019 et NF A 35-020 d'avril 80 (fils à haute adhérence)	Ronds lisses	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.	p.m.	Pas de changement par rapport à la période 67-78.
	Aciers HA	Armatures HA nouvelles : Fe TE 45	440 N/mm²	480 N/mm²	8	1,3 si ϕ < 6 mm 1,6 si ϕ > = 6 mm	1,5	Introduction de 4 types d'armatures : 1 : acier naturellement dur, 2 : acier écrouis sans réduction de section,
		Armatures HA nouvelles : Fe E 50	490 N/mm²	540 N/mm²	8	1,3 si ϕ < 6 mm 1,6 si ϕ > = 6 mm	1,5	3 : acier écrouis avec forte réduction de section, 4 : treillis soudés
De1983 à 1995	**Aciers doux** Nouveau titre 1er du fascicule 4 du CCTG annexé au décret 83-251 du 29/3/83	Ronds lisses : Fe E 215	215 N/mm²	330 à 390 N/mm	22	1	1	Le nouveau fascicule fait référence aux normes pour les diamètres 6 à 40 mm
	Création de la procédure d'homologation par le décret 83-252 du 29/3/83	Fe E 235	235 N/mm²	410 à 490²N/mm²	25	11	1	

Périodes	Références	Dénomination	Limite d'élasticité fe	Limite de rupture fr	Allongement À rupture A %	Coefficient De fissuration η	Coefficient de scellement ψ	Observations
De1983 à 1995	**Aciers HA** Nouvelles normes : NF A 35-015 du 20/7/84 NF A 35-016 du 30/12/86 NF A 35-019 du 20/7/84	Aciers HA Fe E 400 1 Fe E 400 2 Fe E 400 3	400 N/mm²	400 N/mm²	12 sur 5 d 12 sur 5 d 5 réparti	1,6	1,5	Les normes introduisirent 3 catégories (1, 2 et 3) et 3 paramètres de forme : - armatures à verrous transversaux obliques en croissant
	1973 : création de l'AFCAB (Association Française de Certification des Armatures pour Béton).	Fe E 500 1 Fe E 500 2 Fe E 500 3	500 N/mm²	550 N/mm²	12 sur 5 d 8 sur 5 d 5 réparti	1,6	1,5	- armatures torsadées à froid à verrous transversaux obliques en croissant - armatures à empreintes. Diamètres de 6 à 40 mm
		Fe TE 400	400 N/mm²	480 N/mm²	12 sur 5d	1,3 si ϕ > 6 mm 1,5 si ϕ > = 6 mm	1,5	Introduction des 3 paramètres de forme : - à empreinte, - à verrous,
		Fe TE 500	500 N/mm²	550 N/mm²	8 sur 5 d	1,6	1,5	- à nervures continues, dans les diamètres 6 à 16 mm

Tableau n° 3 : évolution des caractéristiques des aciers de BA depuis les années 1900

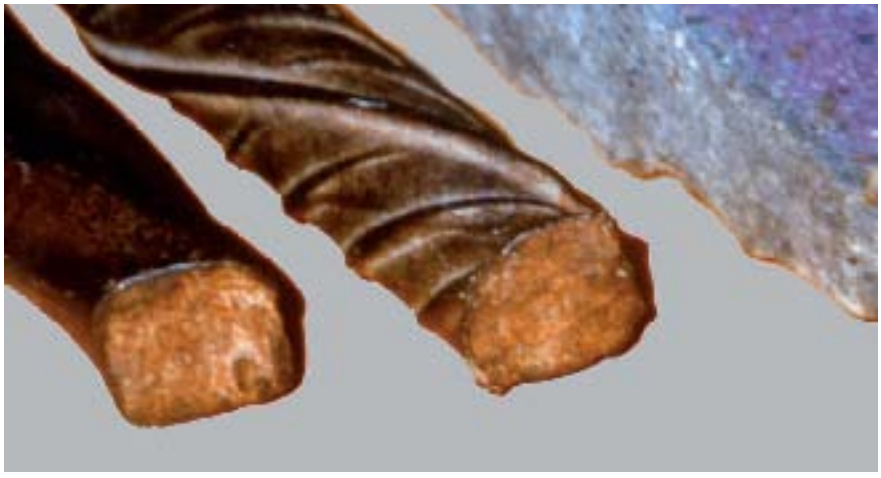


Photo n° 4 : aciers Caron et Tor des années 60 (crédit photo D. Poineau)

2.2.3 LES DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

> En ce qui concerne les dispositions constructives, jusqu'aux années 1950/1960, il y a lieu de noter :

- l'absence de cadres périphériques dans les talons des poutres ;
- l'utilisation de barres relevées, y compris dans les dalles ;
- l'utilisation du frettage généralisé sous forme d'armatures en spirale pour admettre des contraintes de compression plus élevées dans le béton ;

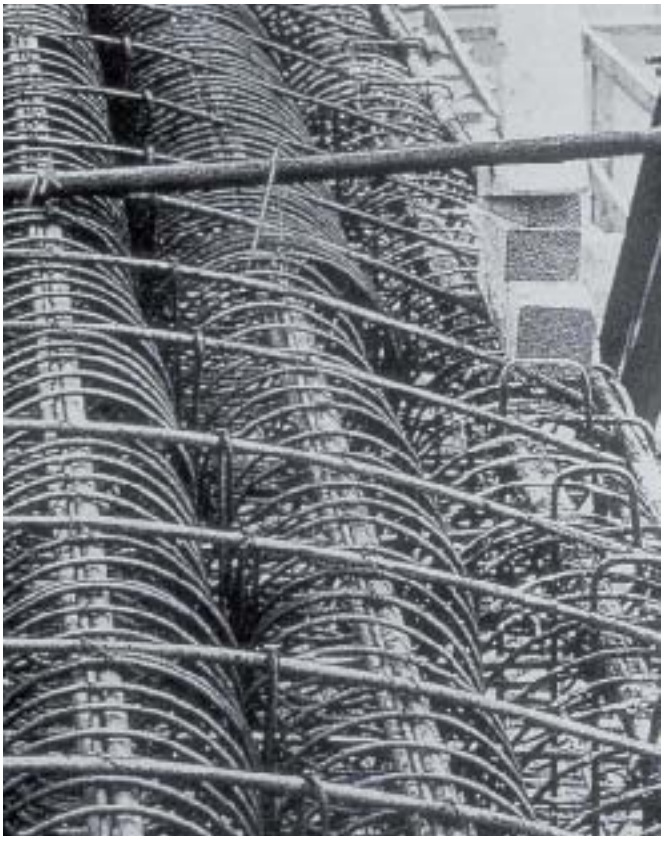


Photo n° 5 : frettage au pont en arc de Châtelguyon 1932-1934 (crédit photo l'Art de l'Ingénieur 1997)

- l'absence d'armatures de peau le long des âmes des poutres et dans les parties comprimées ;
- l'absence d'un enrobage minimum pour les étriers ;

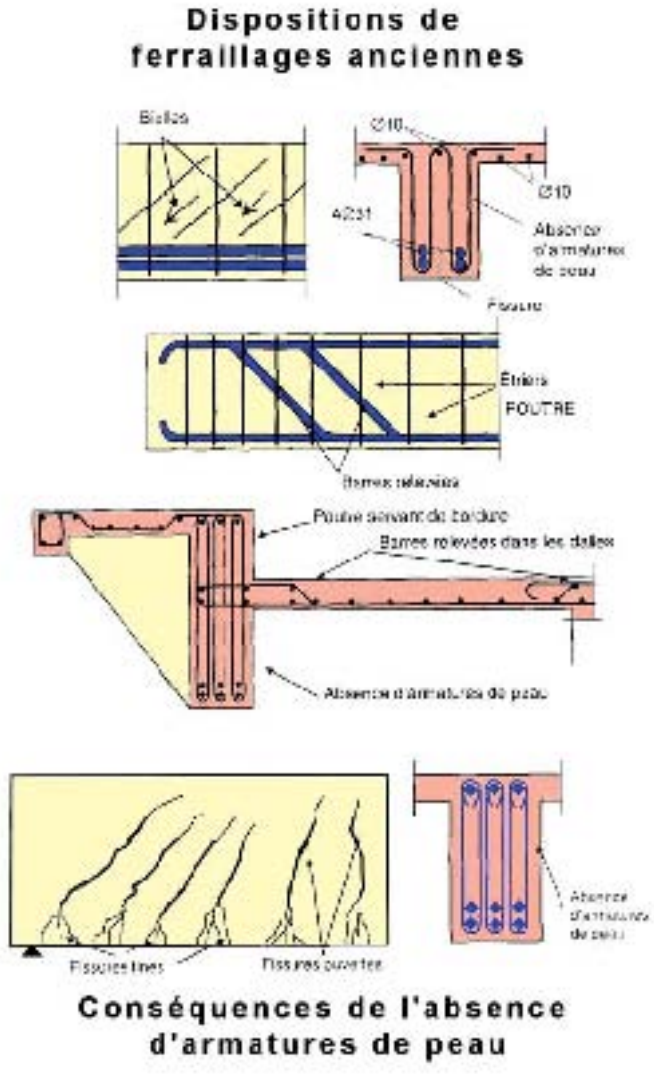


Figure n° 2 : dispositions constructives anciennes

- la géométrie des poutres de rive réduite de moitié par rapport aux poutres centrales (les dalles étant supposées articulées sur les poutres, les poutres de rive étaient donc moins sollicitées) ;

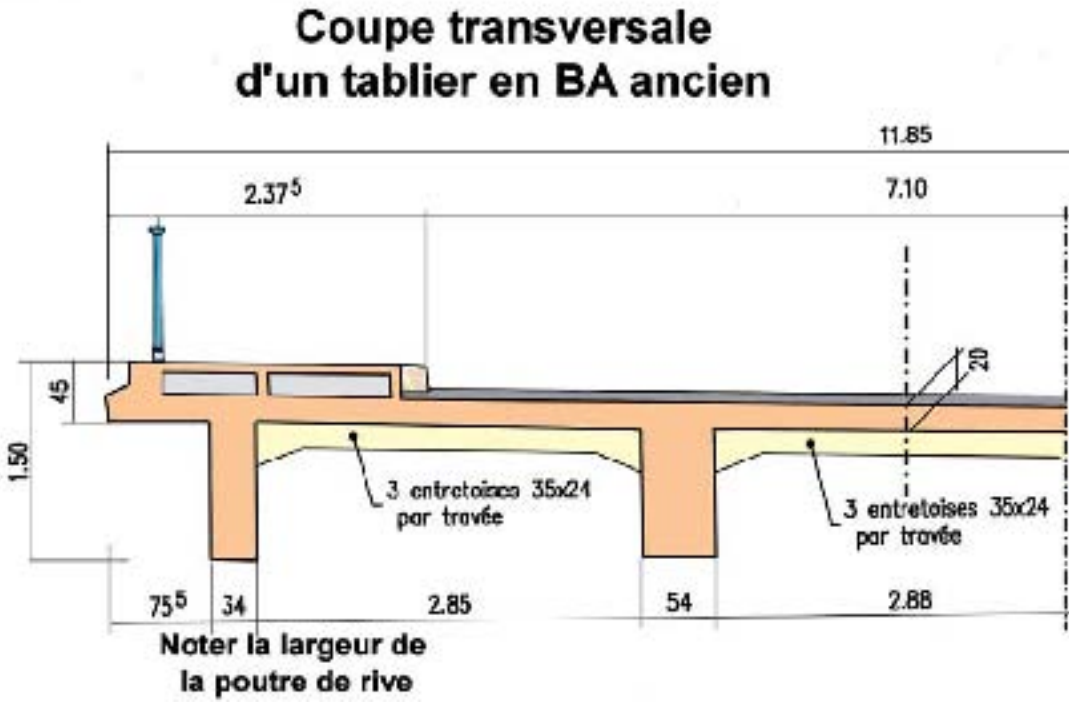


Figure n° 3 : coupe transversale d'un pont ancien

- le recours aux poutres cantilever (plus faciles à calculer car isostatiques) ;
- l'absence de chape d'étanchéité des travées indépendantes (le béton comprimé était considéré comme étanche !) ;
- l'utilisation fréquente et ce, jusque vers les années 50, de coffrages en planches grossières avec enduit de finition comme pour les bâtiments…

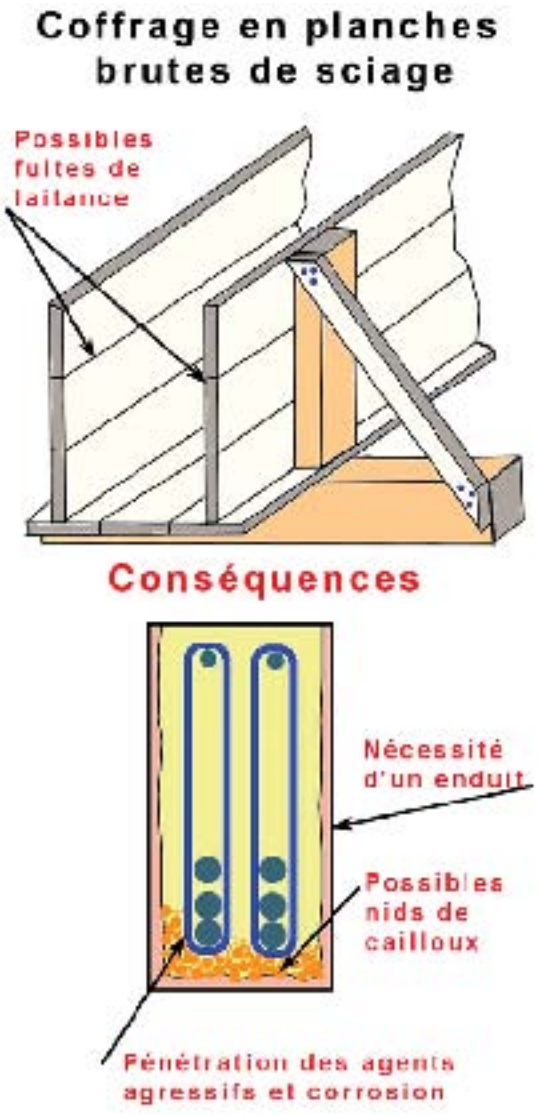


Figure n° 4 : coffrage en planches brutes de sciage

> Il est possible de diviser cette évolution en quatre périodes :

- 1ère période, des débuts du béton armé aux années 1900 ;
- 2ème période, des années 1900 aux années 60 ;
- 3ème période, des années 60 aux années 80 ;
- 4ème période, des années 80 à nos jours.

2.3.1 PÉRIODE DES DÉBUTS DU BÉTON ARMÉ AUX ANNÉES 1900

Cette première période se caractérise **par l'absence de règles de calcul officielles.** Chaque constructeur (Boussiron, Hennebique, Monnier…) avait breveté ses dispositions constructives et mis au point ses propres règles de calcul. Il faut se plonger dans les livres techniques de cette époque pour retrouver les lignes directrices communes à tous les constructeurs et qui allaient permettre de rédiger les premières règles de calcul de 1906.

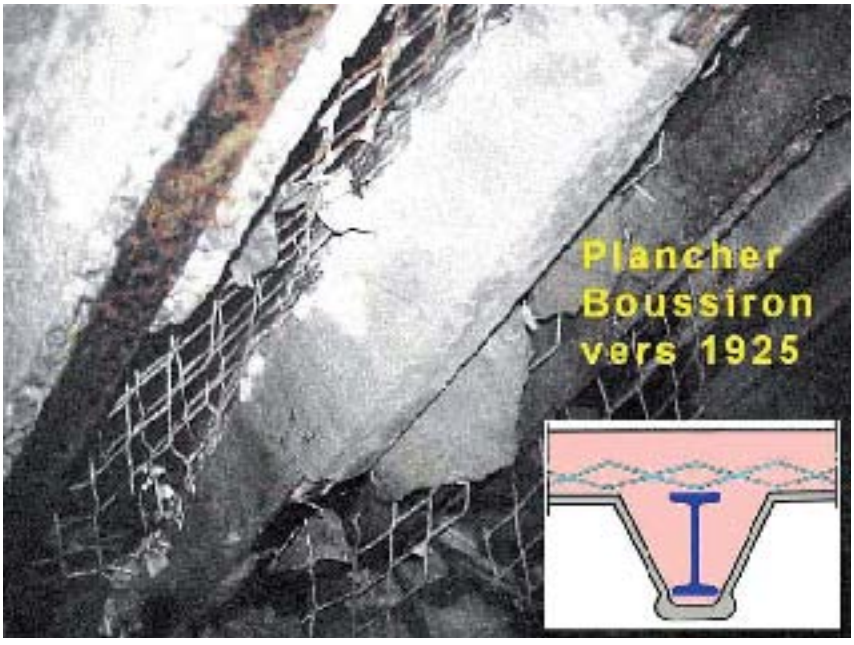


Photo n° 6 : plancher Boussiron (crédit photo Jean-Paul Persy)

2.3.2 PÉRIODE DES ANNÉES 1900 AUX ANNÉES 60

Cette seconde période recouvre **les règles de calcul de 1906 et celles de 1934,** auxquelles ont été associées les règles de charges civiles de 1891, de 1927 (introduction du coefficient de majoration dynamique en 1927/1934) et de 1958/1960.

Il s'agit de règles de calcul dites aux contraintes admissibles, mais sans aucune pondération des actions des combinaisons d'actions. Dans l'ensemble, ces règles de calcul n'ont que peu évolué durant toute cette période[2]. À ces règles, il faut ajouter les règles BA 45 relatives au calcul des ossatures des bâtiments.

2.3.3 PÉRIODE DES ANNÉES 60 AUX ANNÉES 80

Cette troisième période recouvre **les règles de 1960 pour le bâtiment (BA 60), 1964, 1968** (règles CCBA 68) **et 1970** auxquelles ont été associées les règles de charges civiles de 1960, de 1971 et la réédition de 1981.

Il s'agit là encore de règles de calcul aux contraintes admissibles, mais avec pondération des actions variables dans les combinaisons d'actions. De plus, les contraintes limites varient en fonction du type de sollicitation appliquée (compression simple, flexion simple, flexion composée…) ; le comportement à rupture des sections a ainsi été intégré, tout en conservant les méthodes de calcul classiques basées sur la théorie de l'élasticité. Cela a permis de relever fortement les valeurs des contraintes limites. C'est ainsi que la contrainte admissible de compression du béton en flexion simple σ_b pouvait atteindre deux fois la contrainte admissible en compression simple σ_{bo}.

> A noter :

- les règles 68 et 70, applicables à la fois aux ponts et bâtiments ;
- les calculs sous les sollicitations pondérées du 1er et du 2ème genre, celles du 2ème genre pouvant être plus défavorables lorsqu'il n'y a pas proportionnalité des contraintes aux efforts (renversement du sens du moment fléchissant et flexion composée par exemple) ;
- les contraintes limites du béton en fonction de la classe du ciment, de l'épaisseur des pièces et du niveau de contrôle sur le chantier ;
- des règles de vérification des pièces vis-à-vis du flambement, nettement moins évoluées que les règles actuelles ;
- les règles de limitation de la fissuration[3], qui n'ont été que rarement appliquées.

Cette quatrième période recouvre les différentes règles de calcul aux états limites appelées respectivement **BAEL 80, BAEL 83, BAEL 91 et enfin BAEL 99.** Ces règles de calcul ont été associées aux règles de charges de 1971 et à leur réédition de 1981.

[2] Dans le domaine du bâtiment, des règles spécifiques sont apparues en 1945 (BA 45) et également en 1960 (BA 60).

[3] Ces règles de fissuration sont à l'origine des règles de fissuration des règles BAEL et aussi de celles de l'Eurocode 2

Les règles BAEL 80 ont été peu utilisées, car les règles CCBA 70 pouvaient être utilisées concurremment. Les règles BAEL 83 se sont substituées aux règles CCBA 70 lorsque ces dernières ont été abrogées le 31 décembre 1984 par le décret du 7 octobre 1983.

Outre l'introduction des états-limites, les règles BAEL font référence aux résistances caractéristiques des matériaux et non plus aux résistances nominales comme les règles CCBA.

Nota : *dans l'annexe D des règles BAEL, la pondération des charges de calcul des ponts par différents coefficients (1, 1,07, 1,2) pour passer de la valeur nominale à la valeur caractéristique suivant le type de charge et l'état limite considéré est «une cuisine» destinée à ne pas entraîner de bouleversements dans le dimensionnement des ponts tout en assurant une cohérence avec les Directives Communes au Calcul des Constructions de 1979. Les DC 79 ont fixé les bases nécessaires à l'élaboration de règles de calcul cohérentes, aussi bien dans le domaine du béton que celui des fondations....*

Remarque : *les règles BAEL ont été associées au fascicule 65 puis au fascicule 65A. Ces deux textes regroupent les règles d'exécution des structures en béton.*

Les règles de calcul applicables actuellement sont **les règles BAEL 99.** Elles diffèrent peu des règles BAEL précédentes.

3 Conclusion

Avant d'entreprendre l'expertise ou le recalcul d'un ouvrage en béton armé, il est donc nécessaire de se mettre dans **«la peau de son concepteur»** en s'imprégnant des documents de l'époque (cours de béton armé, règlement de calcul, circulaires sur les bétons et les armatures…) et, bien entendu, du dossier de l'ouvrage, car les règles de calcul et les dispositions constructives peuvent être directement liées aux désordres constatés.

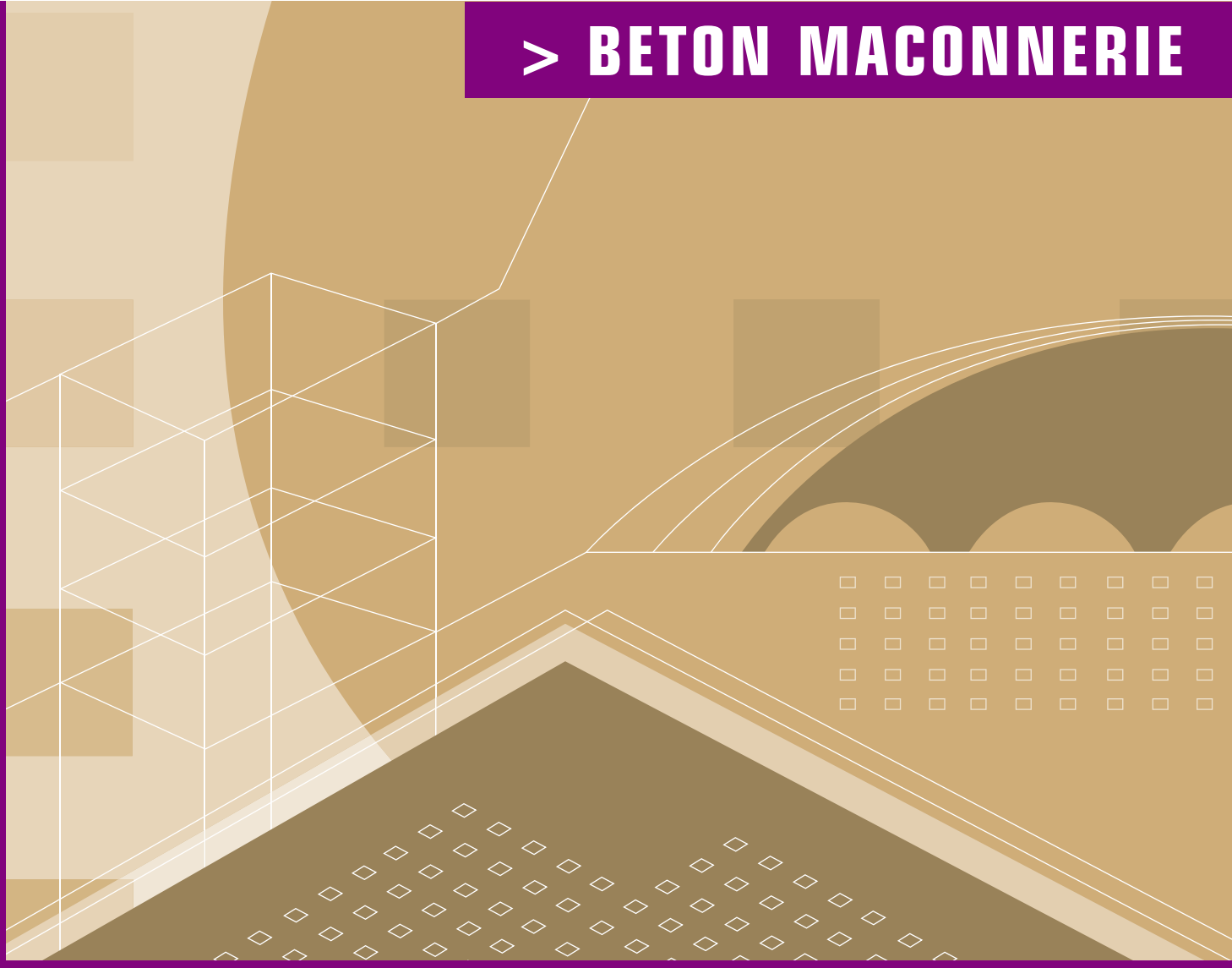
***ATTENTION,* dans le cas contraire, on risque de commettre de grossières erreurs aux lourdes conséquences !**

Exemple d'erreur grave : *lors de l'expertise d'un pont des années 1970, l'ingénieur chargé de cette étude a supposé que les étriers étaient constitués par des barres Fe E500 alors qu'en 1970 seules les barres de type Fe E 400 étaient fabriquées sous le sigle Fe E 40 (fe = 40 kg/mm²) comme le montre le Tableau n° 3 ci-devant.*

Photo n° 7 : pont de Boutiron dans l'Allier construit vers 1912 par Freyssinet (crédit photo D. Poineau)

I FABEM 1 I GUIDES STRRES I

> BETON MACONNERIE



ANNEXE 3
Les aciers inoxidables

STRRES
NOTRE TALENT DÉFIE LE TEMPS

UNE ÉDITION DU SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS
SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES (STRRES) / JUIN 2008

SOMMAIRE

1 GÉNÉRALITÉS **445**

1.1 DÉFINITION D'UN ACIER INOXYDABLE **446**

1.2 LES DIFFÉRENTS FAMILLES D'ACIERS INOXYDABLES **447**

1.3 LES DIFFÉRENTES NUANCES D'ACIERS INOXYDABLES **448**

2 LES ARMATURES DE BÉTON ARMÉ EN ACIER INOXYDABLE **449**

2.1 LA NORMALISATION **450**

2.2 CHOIX DE LA NUANCE EN FONCTION DES CLASSES D'ENVIRONNEMENT **451**

2.3 COMPATIBILITÉ ENTRE LES ACIERS NORMAUX ET LES ACIERS INOXYDABLES **454**

2.3.1 Cas d'une pénétration de chlorures après réparation **454**

2.3.2 Cas d'une carbonatation **455**

2.4 PRÉCAUTIONS À PRENDRE LORS DE LA MISE EN ŒUVRE D'ARMATURES EN ACIER INOXYDABLE **456**

1 Généralités

1.1 Définition d'un acier inoxydable
1.2 Les différentes familles d'aciers inoxydables
1.3 Les différentes nuances d'aciers inoxydables

1.1 Définition d'un acier inoxydable

> Un acier inoxydable satisfait au minimum à la composition suivante :

- teneur en chrome >10,5% en poids ;
- teneur en carbone < 1,2% en poids ;
- teneur en fer : le reste ;
- ajouts possibles : nickel, molybdène, niobium…

A ceci s'ajoutent divers traitements thermiques (trempe, revenu…) et physiques (laminage à chaud ou à froid, écrouissage, tréfilage…) pour améliorer ses propriétés (résistance, facilité de façonnage…).

En fin de fabrication (cas particulier du laminage à chaud), l'acier inoxydable doit être débarrassé des oxydes par un traitement mécanique (brossage, grenaillage…) ou chimique (acides forts), de façon que se forme au contact de l'air **une couche passivante protectrice** (oxydes et hydroxydes de chrome) de très faible épaisseur. **Cette couche est auto-réparatrice** en cas de blessure, **sous réserve** que l'acier soit au contact de l'air, ce qui impose qu'il ne soit pas recouvert de boues, de salissures compactes…

Les différentes familles d'aciers inoxydables 1.2

> Il existe quatre familles d'aciers inoxydables :

1) les aciers inoxydables ferritiques (< 12%Cr, résistance élevée mais façonnage délicat, magnétiques),

2) les aciers inoxydables austénitiques (résistance moindre mais façonnage facile et bonne résistance à la corrosion, **non magnétiques** donc non détectables au pachomètre. Ils sont utilisés pour la confection des ferraillages, par exemple des pièces réservées à l'IRM…dans les hôpitaux…),

3) les aciers inoxydables austino-ferritiques appelés duplex (résistance élevée, façonnables et bonne tenue à la corrosion),

4) les aciers inoxydables martensitiques (non utilisés en construction).

> La série des normes NF EN 10088-* traite des aciers inoxydables comme suit :

- NF EN 10088-1 : Aciers inoxydables – Partie 1 : liste des aciers inoxydables ;
- NF EN 10088-1 : Aciers inoxydables – Partie 2 : conditions techniques de livraison des tôles et bandes en acier de résistance à la corrosion pour usage général ;
- NF EN 10088-1 : Aciers inoxydables – Partie 3 : conditions techniques de livraison pour les demi-produits, barres, fils machines, fils tréfilés, profils et produits transformés à froid en acier de résistance à la corrosion pour usage général ;
- NF EN 10088-1 : Aciers inoxydables – Partie 4 : conditions techniques de livraison des tôles et bandes en acier de résistance à la corrosion pour **usage de construction ;**
- NF EN 10088-1 : Aciers inoxydables – Partie 5 : conditions techniques de livraison pour les barres, fils machines, fils, profils et produits blancs en acier de résistance à la corrosion **pour usage de construction ;**

> La structure cristalline du fer pur est à l'origine des différentes appellations :

- un fer pur à moins de 910°C a une structure cristalline (assemblage d'atomes) de type cubique centrée appelée **structure ferritique ;**
- entre 910°C et 1400°C, la structure cristalline est cubique à faces centrées, appelée **structure austénitique ;**
- au-delà et jusqu'à la fusion, la structure redevient cubique centrée ;
- un chauffage à haute température d'un acier inoxydable chargé en carbone suivi d'un refroidissement brutal (trempe) conduit à la structure martensitique.

1.3 Les différentes nuances d'aciers inoxydables

Dans une même famille, suivant **la composition chimique de l'acier,** il existe **diverses nuances** dont les propriétés peuvent être fort différentes comme le montre le tableau ci-après.

Composants	Incidences sur les propriétés
Azote (N)	Augmente la résistance à certaines corrosions
Chrome (Cr)	Augmente la résistance à certaines corrosions
Nickel (Ni)	Augment la déformabilité si > 10%
Niobium (Nb)	Augment la résistance au fluage
Molybdène (Mo)	Augmente la résistance aux chlorures
Titane (Ti)	Augmente la résistance à certaines corrosions
Soufre	Augmente la sensibilité à la corrosion
Manganèse	Augmente la sensibilité à la corrosion
Carbone	Augmente la sensibilité à la corrosion

Tableau n° 1 : incidences des composants

ATTENTION, *un choix* ***d'une nuance d'acier inadaptée à un environnement agressif donné*** *(par exemple, les chlorures) peut se traduire par* ***une corrosion sévère,*** *telle que la corrosion caverneuse qui détruit le métal par l'intérieur.*

> Les aciers inoxydables sont désignés, soit symboliquement, soit numériquement :

Désignation symbolique	Signification des sigles
X 2 Cr Ni Mo N 22-5-3	X = acier allié 2 = 2% de carbone 22 = 22% de chrome 5 = 5% de nickel 3 = 3% de molybdène N traces d'azote

Tableau n° 2 : désignation des aciers inoxydables

Désignation numérique de la forme : **1. XXXX** («1.» désignant l'acier, c'est le numéro du groupe de matériaux).

Le premier groupe de X (XX) indique la composition comme le montre le tableau suivant :

Désignation numérique				
Composants	**Ni**	**Mo**	**Nb**	**Ti**
40	< 2,5%	Sans	Sans	Sans
41	< 2,5%	Avec	Avec	Avec
43	≥ 2,5%	Sans	Sans	Sans
44	≥ 2,5%	Avec	Avec	Avec
45	Additions particulières			

Tableau n° 3

Le second groupe de X (XX) est le numéro d'ordre du Comité Européen de Normalisation (CEN).

Exemple de désignation numérique : 1.4462

2

Les armatures de béton armé en acier inoxydable

2.1 La normalisation
2.2 Le choix de la nuance en fonction des classes d'environnement
2.3 Compatibilité entres les aciers normaux et les aciers inoxydables
2.4 Précautions à prendre lors de la mise en œuvre d'armatures en acier inoxydable

2.1 La normalisation

> La norme expérimentale XP A 35-014 : Aciers pour béton armé – Barres et couronnes lisses, à verrous ou à empreintes en acier inoxydable, désigne les armatures comme suit :

- INE235
- INE500
- INE650
- INE800

Le chiffre correspond à la valeur de **la limite d'élasticité** exprimée en MPa (N/mm²). Les armatures de béton armé appartiennent aux classes 235 et 500.

À ceci s'ajoute **la désignation symbolique ou numérique** susvisée comme le montre l'exemple suivant :

InE500 (X 2 Cr Ni Mo 22-5-3) - InE500 (1. 4462)

Les petits diamètres (< 12 ou 18 mm) sont fabriqués par laminage à froid et les autres diamètres par laminage à chaud.

La résistance à la corrosion des armatures de béton armé en acier inoxydable pour un milieu donné est mesurée par **le potentiel de piqûres.** Plus il est élevée, meilleure est la tenue de l'acier à ce type de corrosion.

Le tableau suivant (DONNÉ À TITRE INDICATIF) est inspiré du document suisse visé dans le présent texte ; il donne l'indice de résistance aux piqûres WS (WS = %Cr + 3,3%Mo + 0%N) et la classe de résistance à la corrosion des principaux aciers pour armatures disponibles sur le marché français.

	Familles et nuances	Désignation	Indice de résistance aux piqûres WS	Classe de résistance à la corrosion
Aciers ferritiques				
	1.4511	X 3 Cr Nb 17	17	2
Aciers duplex				
Haute tenue à la corrosion + hautes caractéristiques mécaniques	1.4462	X 2 Cr Ni Mo N 22-5-3	31	3
Aciers austénitiques				
Austénitique basique	1.4301	X 5 Cr Ni 18-10	18	2
Austénitique + N	1.4311	X 2 Cr Ni N 18-10	18	2
Austénitique + Mo	1.4401	X 5 Cr Ni Mo 17-12-2	23	3
Austénitique + Mo + N	1.4429	X 2 Cr Ni Mo N 17-13-3	26	3
Austénitique + Mo	1.4436	X 3 Cr Ni Mo N 17-13-3	26	3
Austénitique + Mo + Ti	1.4571	X 6 Cr Ni Mo Ti 17-12-2	23	3
Austénitique à très haute résistance à la corrosion	1.4539	X 1 Cr Ni Mo Cu 25-20-5	41	4
Nouvel austénitique	1.4597	X 8 Cr Mn Cu Nb 17-8-3	Idem 4301	2

Tableau n° 4 : indices de résistance aux piqûres et à la corrosion

Le document précise que **l'indice de résistance aux piqûres WS,** bien que n'ayant **aucune justification scientifique,** est une règle empirique utilisable. Le document suisse conseille dans le tableau ci-après et pour les ouvrages neufs les indices WS suivants, qui excluent de fait **les aciers ferritiques.**

Durée de vie souhaitée	Sollicitation due aux chlorures	Indice de résistance à la piqûration WS et classe de résistance à la corrosion
> 70 à 100 ans sans remise en état	Moyenne ou forte	>17 / 20
	Élevée ou très élevée avec fissures, écoulement des eaux et enrobage < 3 cm	>23 / 30 voire 31 / 34 (parties difficilement accessibles…)

Tableau n° 5 : choix de l'indice de résistance aux piqûres

> Teneurs en chlorures probables à terme du béton :

Quantification	Quantité de chlorures en % de la masse de ciment
Faible	≤ 0,6%
Moyenne	0,6% < ≤ 1,5%
Élevée	1,5% < ≤ 5%
Très élevée	> 5%

Tableau n° 6 : qualification des teneurs en chlorures

Nota : *le document suisse exclut* ***les aciers duplex en cas de risque d'incendie*** *à cause de leur fragilisation à partir de 475°C. En fait, les aciers duplex ont un comportement au feu légèrement moindre que les aciers austénitiques mais, nettement meilleur que les aciers ordinaires qui voient leur résistance mécanique chuter à partir de 400°C*

Le tableau qui suit (DONNÉ À TITRE INDICATIF) est un montage réalisé à partir, d'une part, du guide T.81 de CIMbéton et, d'autre part, **de la notice technique UGITECH (www.ugine-savoie.com).** Il propose un choix de nuances en fonction des classes d'exposition à l'environnement de **la norme NF EN 206-1.** Certaines autres nuances peuvent être utilisées mais il est nécessaire de consulter un spécialiste en corrosion.

Photo n° 1 : armatures de béton armé en acier inoxydable (crédit photo F. Moulinier)

Classe d'exposition		Nuances			
		Satisfaisantes en qualité prix	Exigences de sécurité accrues	Déconseillées	Envisageables sur avis d'un expert
XC : corrosion induite par la carbonatation :					
Sec ou humide en permanence	**XC1**	1.4511	1.4597	Sans objet	Sans objet
Humide, rarement sec	**XC2**	1.4597	1.4301	1.4511	Sans objet
Humidité modérée	**XC3**	1.4597	1.4301	1.4511	Sans objet
Alternances d'humidité et de séchage	**XC4**	1.4597	1.4301	1.4511	Sans objet
XD : corrosion induite par les chlorures autres que marins					
Humidité modérée	**XD1**	1.4597	1.4301	1.4511	Sans objet
Humide, rarement sec	**XD2**	1.4401 1.4436 1.4571	1.4429 1.4539 1.4462	1.4511	1.4301 1.4597
Alternances d'humidité et de séchage	**XD3**	1.4401 1.4436 1.4571	1.4429 1.4539 1.4462	1.4511	1.4301 1.4597
XS : corrosion induite par les chlorures en mer					
Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact avec l'eau de mer	**XS1**	1.4401 1.4429 1.4436 1.4571	1.4539 1.4462	Autres nuances	1.4301 1.4597
Immergé en permanente	**XS2**	1.4539 1.4462	Sans objet	Autres nuances	Sans objet
Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns	**XS3**	1.4539 1.4462	Sans objet	Autres nuances	Sans objet
XF : attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage					
Saturation en eau modérée **sans agent de déverglaçage (*)**	**XF1**	1.4597	1.4301	Sans objet	1.4511
Saturation modérée en eau avec agents de déverglaçage	**XF2**	1.4401 1.4436 1.4571	1.4429	1.4511	1.4301 1.4597
Forte saturation en eau **sans agent de déverglaçage (*)**	**XF3**	1.4597	1.4301	Sans objet	1.4511
Forte saturation en eau avec agents de déverglaçage	**XF4**	1.4539 1.4462	Sans objet	Autres nuances	Sans objet
XA : attaques chimiques (Tableau n°2 NF EN 206-1)					
Faible agressivité chimique	**XA1**	1.4597	1.4301	Sans objet	1.4511
Agressivité chimique modérée	**XA2**	1.4401 1.4436 1.4571	1.4429	1.4511	1.4301 1.4597
Forte agressivité chimique	**XA3**	1.4539 1.4462	Sans objet	Autres nuances	Sans objet

Tableau n° 7 : choix des nuances

2.3 Compatibilité entres les aciers normaux et les aciers inoxydables

Rappel, *les tableaux de classification de la résistance à la corrosion des métaux en fonction de leur potentiel normal montrent qu'un acier normal au contact d'un acier inoxydable, lequel a le potentiel le plus élevé, va se transformer en anode et se sacrifier au bénéfice de l'acier inoxydable qui se transforme en cathode.*

Lors d'une réparation, les armatures en aciers normal vont être dégagées et débarrassées de toute trace de corrosion. Des armatures de peau en acier inoxydable (voire des armatures de renfort) peuvent être mises en place **sans contact avec les armatures en acier ordinaire** et le tout va être enrobé dans un mortier ou un béton.

Le développement qui suit sur le comportement vis-à-vis de la corrosion d'armatures mixtes comportant des armatures en acier inoxydable et des armatures en acier normal est extrait de l'article 4.5 du document suisse.

2.3.1 CAS D'UNE PÉNÉTRATION DE CHLORURES APRÈS RÉPARATION

- **1er cas :** tant que **l'acier inoxydable et l'acier normal restent passifs** (faible teneur en chlorures du béton), les deux types d'aciers ne subissent qu'une très faible corrosion, puisque le courant de corrosion à l'état passif est très peu élevé. **Il n'y a donc pas d'incompatibilité entre les deux matériaux ;**

- **2ème cas : si la nuance de l'acier inoxydable n'a pas été correctement choisie,** dès que le dosage en chlorures autour des armatures en acier inoxydables atteint le seuil de corrosion, des piqûres (anodes) vont se former à la surface de l'acier inoxydable. Les surfaces de l'inoxydable non touchées ont une fonction de cathode et il en est de même des armatures en acier normal situées en deuxième lit dans une zone moins chargée en chlorures. La surface des anodes étant faible par rapport à la surface des cathodes, le courant de corrosion va être important et la corrosion relativement active[1]. **Il faut donc éviter ce cas de figure par un bon choix de nuance ;**

- **3ème cas : si la nuance d'acier inoxydable a été correctement choisie,** le taux de chlorure va finir par atteindre le seuil critique au niveau des armatures en acier normal avec formation de piqûres. Cependant, comme l'enrobage de ces aciers est important, la teneur en oxygène, le taux d'humidité et la teneur en chlorures sont plus faibles que dans le deuxième cas et la vitesse de corrosion est donc plus faible (des essais montrent une réduction du courant de corrosion variant entre 3 à 6). Il se développe une corrosion voisine de celle qui se produirait s'il n'y avait pas d'armatures en acier inoxydable.

[1] *Dans le document suisse il est fait référence à une étude FHWA 1998 de McDonald où il a été constaté sur des éprouvettes de laboratoire que l'acier inoxydable pouvait avoir un moins bon comportement lorsqu'il était en contact avec un acier non allié que lorsqu'il était en contact avec un acier inoxydable de même nuance.*

2.3.2 CAS D'UNE CARBONATATION

- **1er cas : tant que le front de carbonatation n'atteint pas les armatures,** les deux aciers restent passifs, comme dans le cas d'une pénétration de chlorures ;
- **2ème cas :** lorsque le front de carbonatation atteint l'acier inoxydable, **aucune corrosion ne peut se produire** puisque l'acier inoxydable ne se corrode pas à l'air libre (en l'absence de chlorures…) ;
- **3ème cas :** dans le cas où l'enrobage est important et le mortier ou le béton de réparation sont de qualité, la durée de la carbonatation est longue **ce qui met pratiquement l'acier normal à l'abri de la corrosion.** Cependant, si elle se produit, la carbonatation étant homogène, la corrosion de l'acier ordinaire sera généralisée, mais avec une surface anodique importante et donc un courant de corrosion faible.

2.4 Précautions à prendre lors de la mise en œuvre d'armatures en acier inoxydable

1) le stockage des armatures en acier inoxydable doit être séparé de celui des armatures en acier normal, car des taches de rouille sur un acier inoxydable peuvent amorcer une corrosion ;

2) la coupe et le façonnage des armatures en acier inoxydable doivent être effectués avec des outils en acier inoxydable ou non métalliques (plastique, céramique…) ;

3) le façonnage par chauffage des armatures en acier inoxydable est formellement déconseillé, car il modifie les propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion de l'acier ;

4) les ligatures entre les armatures en acier inoxydable doivent être effectuées à l'aide de fils en acier inoxydable doux ou d'attaches en plastique (prévoir les mêmes précautions pour les cales et écarteurs) ;

5) le soudage entre des armatures en acier inoxydable dépend de la famille des aciers à souder. Il est :

   a. facile entre les aciers austénitiques à faible teneur en carbone (C < 0,03%) ou entre les aciers stabilisés au titane ou au niobium,

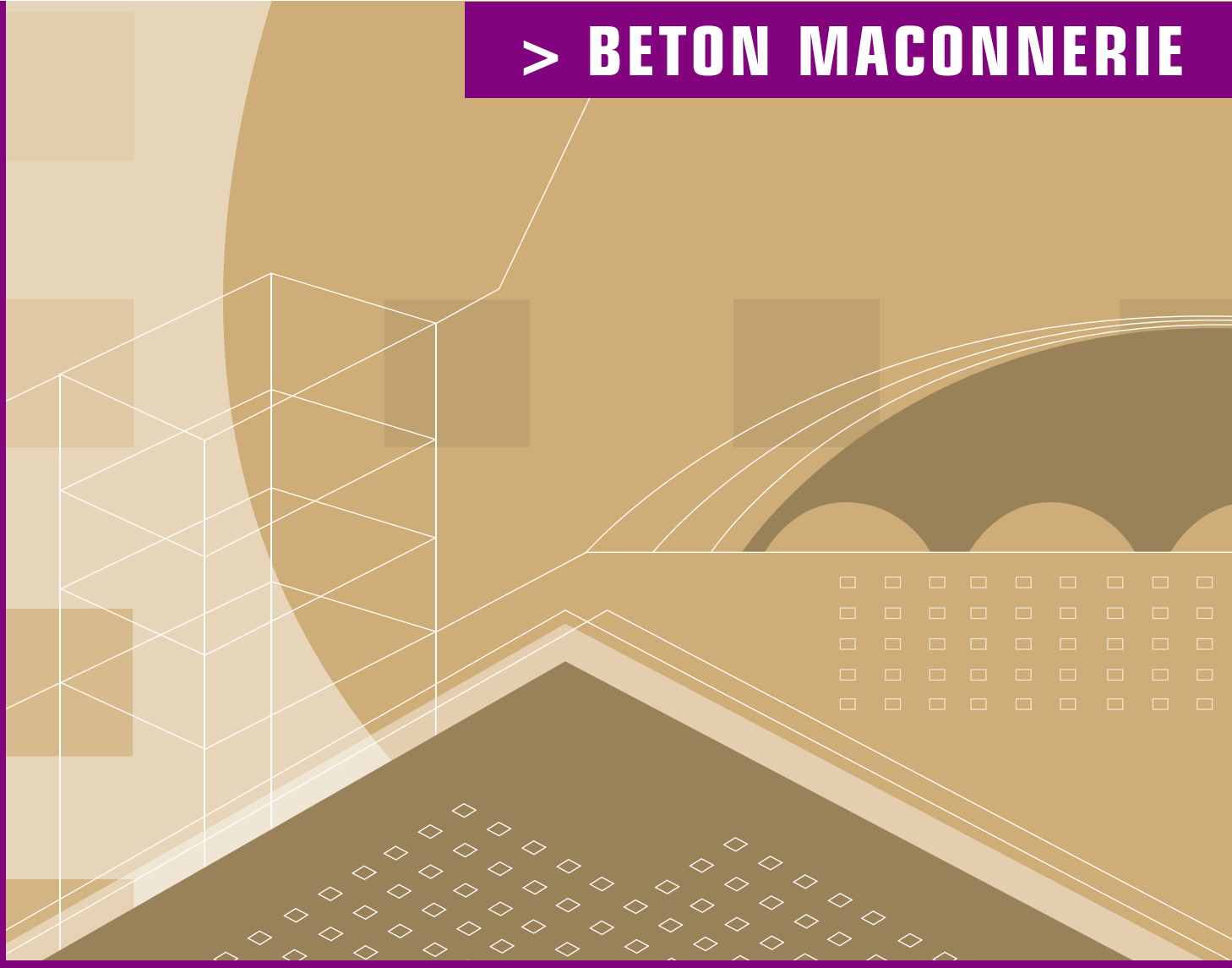
   b. plus délicat avec les aciers duplex ou ferritiques, avec des risques de pertes des caractéristiques mécaniques ou de résistance à la corrosion.

ATTENTION, *toute soudure doit être nettoyée, soit avec une brosse non métallique, soit par sablage ou grenaillage, pour éviter toute corrosion localisée !*

Photo n° 2 : corrosion d'un acier inoxydable au droit de soudures (crédit photo D. Poineau)

I FABEM 1 I GUIDES STRRES I

> BETON MACONNERIE



ANNEXE 4
L'hydrodémolition

STRRES
NOTRE TALENT DÉFIE LE TEMPS

UNE ÉDITION DU SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS
SPÉCIALISTES DE TRAVAUX DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES (STRRES) / JUIN 2008

SOMMAIRE

1 LE CHOIX DU MATÉRIEL À UTILISER **459**

1.1 ENLÈVEMENT PRÉCIS DE PETITS VOLUMES DE BÉTON DANS DES EMPLACEMENTS D'ACCÈS DIFFICILE **461**

1.2 ENLÈVEMENT DE PETITES ÉPAISSEURS DE BÉTON **462**

1.2.1 Cas du traitement de petites surfaces **462**

1.2.2 Cas du traitement de grandes surfaces **463**

1.3 DESTRUCTION DE GROS VOLUMES DE BÉTON SUR DES ÉPAISSEURS IMPORTANTES AVEC MISE À NU DE PLUSIEURS COUCHES D'ARMATURES **464**

2 PROTECTION ET SÉCURITÉ SUR LES CHANTIERS **465**

1 Le choix du matériel à utiliser

1.1 Enlèvement précis de petits volumes de béton dans des emplacements d'accès difficiles

1.2 Enlèvement de petites épaisseurs de béton

1.3 Destruction de gros volumes de béton sur des épaisseurs importantes avec mise à nu de plusieurs couches d'armatures

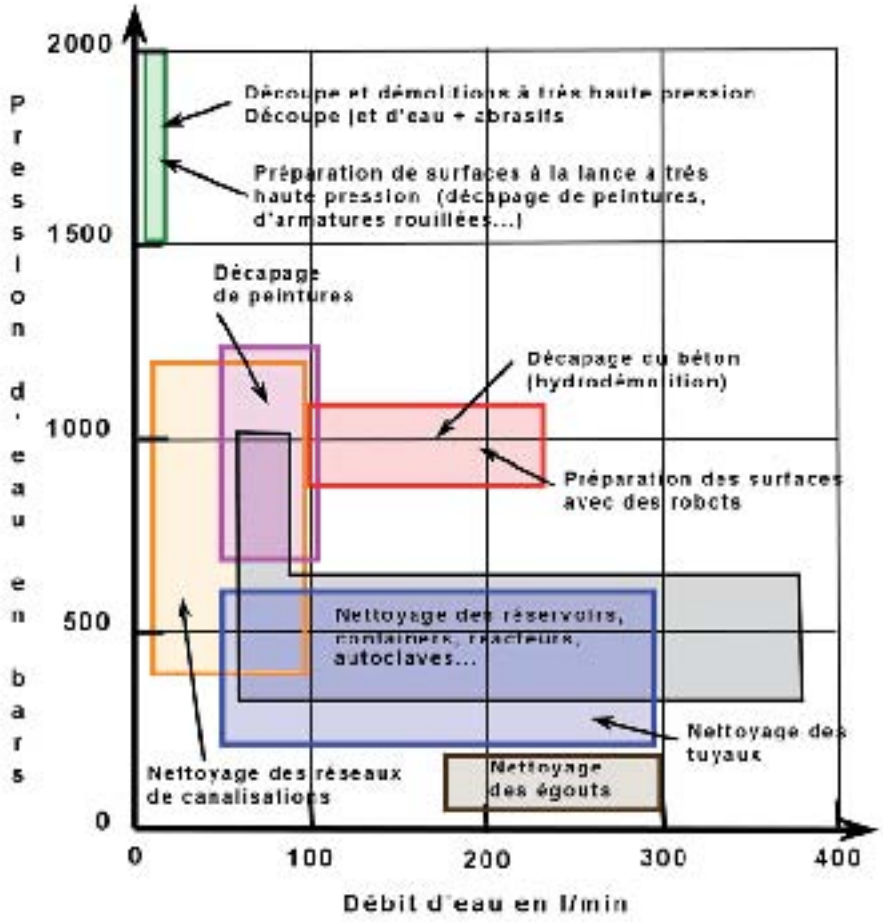


Figure n° 1 : relation entre pression et débit (d'après le document de M. Momber)

Photo n° 1 : lance manuelle en action lors d'une démonstration (crédit photo D. Poineau)

Il s'agit de travaux difficiles et coûteux. On utilise une lance manuelle équipée d'une buse unique (mono buse) avec une pression très élevée de 150 MPa à 250 MPa (soit 1500 à 2500 bars), avec un débit d'eau de 12 à 25 l/mn (la forte pression compense en partie le faible débit d'eau). Le rendement est faible et ne dépasse pas 0,5 m^3 par jour.

1.2 Enlèvement de petites épaisseurs de béton

Il s'agit des travaux au cours desquels il faut procéder à l'enlèvement de la laitance, à la création d'une surface rugueuse, au décapage du béton sur moins d'un centimètre d'épaisseur… Par exemple, pour permettre la mise en place d'une chape d'étanchéité ou pour exécuter un ragréage de faible épaisseur, …

Bien entendu, si les caractéristiques du béton (résistance) ne sont pas homogènes sur toute sa surface, des trous risquent de se former dans les zones les plus faibles, en particulier si le porte-lance n'est pas parfaitement entraîné.

1.2.1 CAS DU TRAITEMENT DE PETITES SURFACES

Pour le décapage de petites surfaces, il faut utiliser une lance manuelle à buses multiples.

Photo n° 2 : lance à buses multiples

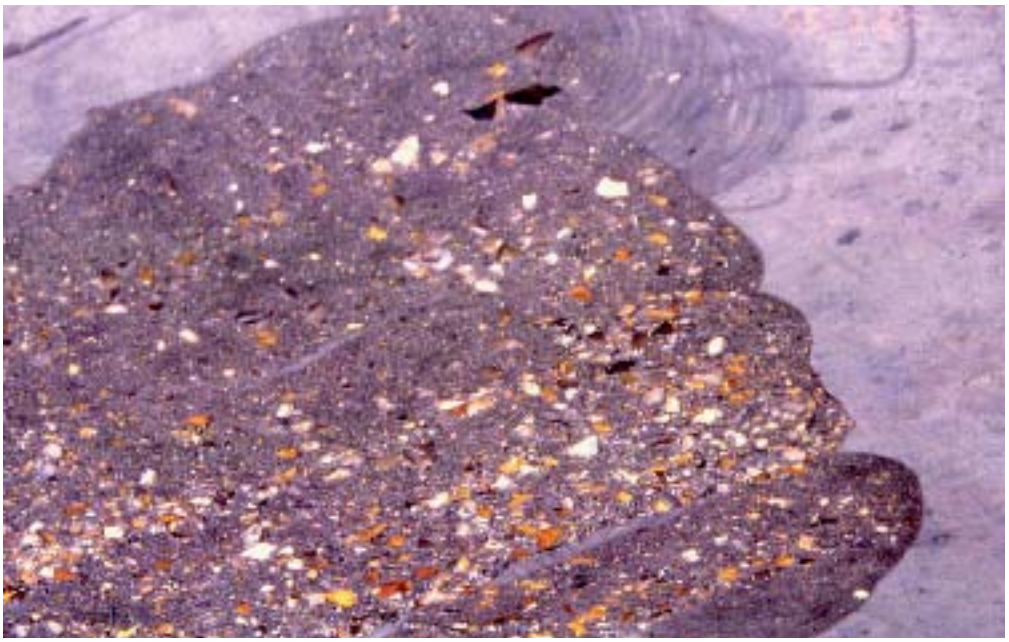


Photo n° 3 : résultats d'un décapage léger (crédit photo D. Poineau)

1.2.2 CAS DU TRAITEMENT DE GRANDES SURFACES

Pour le décapage de grandes surfaces, il faut utiliser une lance à buses multiples fixée sur une tête rotative, montée elle-même sur un robot alimenté par une pompe à haute-pression (~ 110 à 120 MPa) et à fort débit (150 à 250 1/mn). Le rendement peut atteindre 50 m²/heure.

Photo n° 4 : appareil de décapage des sols (crédit photo Rivard)

1.3 Destruction de gros volumes de béton sur des épaisseurs importantes avec mise à nu de plusieurs couches d'armatures

Pour la destruction de gros volume de béton armé, il faut utiliser on utilise une lance à buse simple (mono buse), montée sur un robot alimenté par une pompe à haute-pression et à fort débit. Le robot est équipé d'un bras télescopique orientable dans toutes les directions, qui permet de travailler au sol par bande pouvant atteindre 2 m de large et sur les murs et voiles verticaux ou inclinés dans les mêmes conditions.

La pression atteint 110 à 120 MPa (1 100 à 1 200 bars) pour un débit d'eau de 150 à 250 l/mn. Le rendement d'une telle machine peut atteindre un taux de destruction de 10 m^3 de béton par jour.

Remarque : *pour le travail dans des lieux où le robot ne peut pas accéder, il est possible d'utiliser un cadre métallique qui va guider la buse sur son parcours vertical et horizontal (se reporter à la photo des démolitions des déviateurs du pont de Bergerac ci-après).*

Photo n° 5 : robot Conjet en démonstration (crédit photo D. Poineau)

Photo n° 6 : démolition limitée au béton de mauvaise qualité d'un déviateur du pont de Bergerac (crédit photo J.M. Lacombe)

2

Protection et sécurité sur les chantiers

Les ouvriers doivent revêtir une combinaison spéciale, des bottes renforcées une protection des oreilles (bruit), un casque avec visière, des gants (consulter les fiches CNRS de janvier 1995).

Photo n° 7 : tenue de protection (crédit photo D. Poineau)

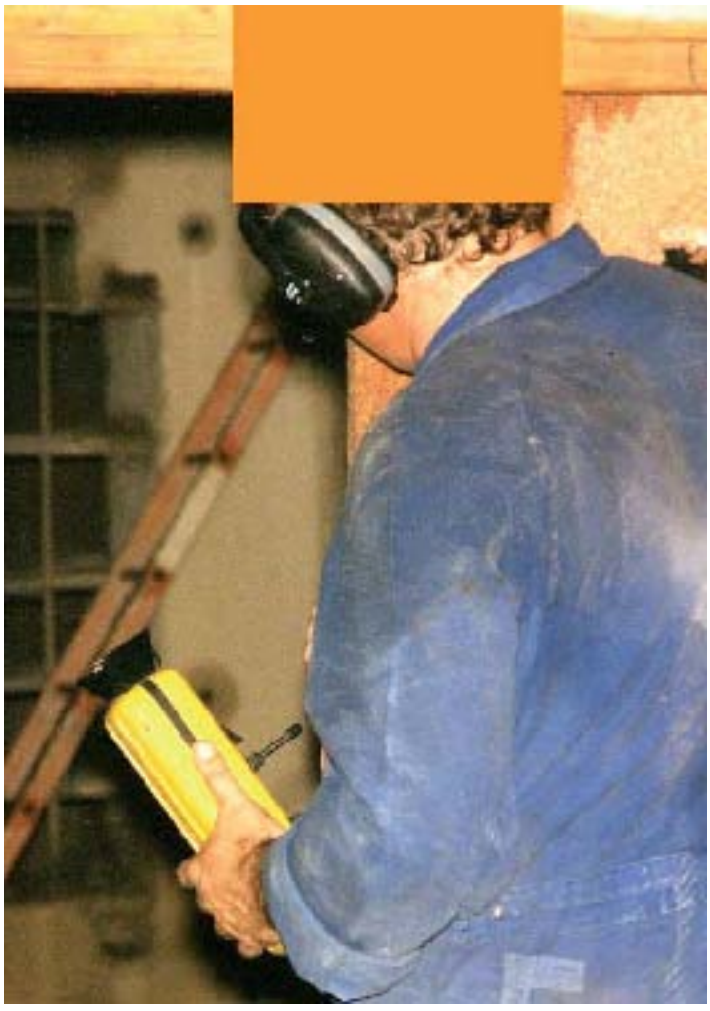


Photo n° 8 : opérateur avec protection phonique (crédit photo J.M. Lacombe)

Photo n° 9 : dispositifs de protection au viaduc d'Orgemont (crédit photo D. Poineau)

Pour limiter les projections éventuelles, les buses sont placées sous des capots. Dans le cas où les capots ne peuvent être utilisés, il faut mettre en place des protections de l'ordre de 2,50 m de hauteur. Même avec les capots, des projections se produisent, aussi, il faut prévoir des écrans de protection.

Lorsque la démolition concerne toute l'épaisseur de la pièce, il faut placer un cintre sous l'ouvrage avec un robuste plancher recouvert de panneaux de tôle ondulée, qui sont très efficaces pour absorber les effets du jet d'eau.

Le comité de pilotage chargé du GUIDE STRRES N° 1 de la famille BETON MACONNERIE [FABEM 1] était composé de :

Christian TRIDON, président du STRRES
Bernard FARGEOT, président d'honneur du STRRES
Hubert LABONNE, vice- président d'honneur du STRRES

Philippe ARVILLE	EIFFEL
Didier CHABOT	COFEX
Gil CHARTIER	RCA
Damien COLOMBOT	BAUDIN-CHATEAUNEUF
Gérard COLLE	COFEX
Xavier JULLIAN	SOLETANCHE BACHY
Jean-Pierre GADRET	SOLETANCHE BACHY
Christian TOURNEUR	FREYSSINET

Le GUIDE STRRES N° 1 de la famille BETON MACONNERIE [FABEM 1] a été rédigé par :

Daniel POINEAU
Yves MOUTON

Ce document a été réalisé avec le concours
de la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP)
et de la Fédération Française du Bâtiment (FFB).

! Retour au sommaire !

STRRES
NOTRE TALENT
DÉFIE LE TEMPS